



**Ana Cristina Caldeira
da Silva Gouveia
Carvalho**

**A Qualidade do Ar e as Alterações Climáticas em
Portugal**



**Ana Cristina Caldeira
da Silva Gouveia
Carvalho**

**A Qualidade do Ar e as Alterações Climáticas em
Portugal**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Borrego, Professor Catedrático do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro da Fundação para a Ciência e tecnologia (FCT) e do Fundo Social Europeu no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio pela Bolsa de Doutoramento Refª PRAXIS XXI/BD/21474/99 e pelo financiamento dos projectos de investigação aprovados no Programa Operacional "Ciência, Tecnologia, Inovação" QUIMERA – "Alterações climáticas em Portugal: impacto na ocorrência de fogos florestais e na qualidade do ar" (POCTI/34346/CTA/2000) e STRATOZON – "O ozono estratosférico na baixa troposfera sobre Portugal" (POCTI/CTA42702/2001).

O júri

Presidente

Doutora Maria Helena Vaz de Carvalho Nazaré
Reitora da Universidade de Aveiro

Vogais

Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas
Professor Catedrático da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de
Coimbra

Doutor Carlos Alberto Diogo Soares Borrego
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutor Casimiro Adrião Pio
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Nelson Augusto Azevedo Barros
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Fernando Pessoa

Doutora Ana Isabel Couto Neto Silva Miranda
Professora Associada da Universidade de Aveiro

Doutor José Vicente Pérez Muñuzuri
Professor Titular da Universidade de Santiago de Compostela

agradecimentos

Correndo o risco de alguém ficar na penumbra, não posso deixar esta página em branco.

A conclusão deste trabalho apenas foi possível por integrar no grupo de trabalho GEMAC, a minha segunda casa, liderado pelo Orientador Prof. Carlos Borrego, a quem agradeço por me ter dado esta oportunidade.. Claro está que a todos os elementos-colegas-amigos que fizeram e fazem parte deste grupo devo um grande OBRIGADA, pelo que com eles aprendi, às vezes com acesas discussões, quase levadas ao rubro (Xana e Oxana, será pela terminação?!) e pelo que socializá(a)mos.

Contudo, há alguns obrigadas mais particulares porque sem eles poderia estar mais 10 anos a acabar esta tese. Assim, Helena, Anabela, Pedro e Joanas (são duas em um, sem perder a identidade) um grande, grande BEM-HAJA!

A todos os professores do Departamento de Ambiente e Ordenamento, e fora dele, que gentilmente me aclararam algumas dúvidas-obstáculos exprimo o meu apreço.

A todos os meus amigos pelo incentivo. À minha família devo um agradecimento desculpado pelo muito tempo que deixámos de estar juntos, sobretudo a quem comigo compartilha sonhos e projectos. Ao Paulo mais do que um obrigada!

à mãe da minha mãe e à minha mãe...

palavras-chave

Qualidade do ar, intrusões de ozono estratosférico, alterações climáticas, séries temporais de poluentes atmosféricos

resumo

O desenvolvimento das sociedades humanas e das suas actividades tem interferido com o sistema climático. Neste sistema, a composição da atmosfera está extremamente dependente, directa ou indirectamente, das emissões de gases atmosféricos resultantes dessas actividades. Neste âmbito, a monitorização de gases de efeito de estufa tornou-se importante devido ao seu impacto no balanço radiativo do sistema Terra-atmosfera e as consequências que introduzem em todo o sistema climático, à escala planetária. O ozono, apesar de não constituir um dos poluentes a reportar à Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, é um gás de estufa cuja inter-relação com o clima é estreita.

O estudo das concentrações de ozono na atmosfera constitui o fio condutor desta tese. Assim, este trabalho pode dividir-se em três grandes linhas: uma primeira parte em que se estudou a tendência das concentrações de ozono e seus precursores, nomeadamente os óxidos de azoto e monóxido de carbono, e ainda a sua relação com a estrutura vertical da atmosfera; a secção intermédia onde se analisam casos de estudo em que ocorrem trocas de ozono entre a baixa estratosfera e a troposfera média, com impacto nas concentrações medidas à superfície; e, por fim, a estimativa da qualidade do ar em cenário futuro, em torno do ano 2050.

Os resultados mostram que, tal como em outros países do Hemisfério Norte, as tendências das concentrações de ozono medidas em superfície são positivas, embora as dos seus precursores sejam negativas ou nulas, em particular em relação ao monóxido de carbono.

A correlação positiva encontrada entre as concentrações de ozono e a instabilidade termodinâmica na atmosfera no Inverno dá indicações de que os processos dinâmicos responsáveis pela introdução de ozono estratosférico na troposfera são importantes em Portugal. Os modelos numéricos usados nesta análise mostraram ser uma ferramenta importante na justificação de episódios de ozono não-fotoquímicos. Este termo do balanço de ozono troposférico poderá vir a ter uma contribuição importante em cenário de alteração climática.

Por fim, a qualidade do ar em cenário futuro, em dias de elevado potencial fotoquímico, mostrou um empobrecimento em relação ao ozono e, em particular ao dióxido de azoto. O agravamento do índice de seca, índice de risco de incêndio bem correlacionado com a área ardida e consequentemente com as emissões atmosféricas resultantes da queima de biomassa, será mais severo em cenário climático futuro.

Espera-se que o trabalho aqui desenvolvido, entre outros na mesma área, contribua no apoio à decisão quanto à estruturação, em termos das suas eficiências energéticas, das actividades responsáveis pelas emissões de gases para a atmosfera pelas suas consequências regionais e globais.

keywords

Air quality, stratospheric ozone intrusions, climate change, air pollutants data series

abstract

Through their activities human societies have been interfering with the climatic system, proportionally to their growth and development. Within the climatic system, atmosphere composition is extremely dependent on emissions to the atmosphere resulting from human activities. Hence, monitoring greenhouse gases has become an important task due to their role in the earth-atmosphere radiative budget and its consequences on the climatic system at a global scale. Although ozone is not considered on the Countries Reports to the United Nations Framework Convention on Climate Change it is a greenhouse gas with strong interactions with climate.

The work presented here is based in three main, and interconnected, parts: the first one follows the tendency on ozone and precursors analysis, namely carbon monoxide and nitric oxides concentrations in time, and how they may be related with local atmospheric thermodynamic vertical structure; the second one explores the stratosphere-troposphere exchanges and their impact on surface ozone concentrations; finally, the last part concerns the analysis of the impact on air quality in the middle of this century for an integrated emission-climate scenario.

The results show that surface ozone concentrations are increasing with time over Portugal, although precursors concentrations are diminishing, notably for carbon monoxide, according to the tendency verified in the Northern Hemisphere by other authors.

The positive correlations encountered for surface ozone concentrations and atmospheric instability during winter time give indications that dynamical processes responsible for stratospheric ozone into the troposphere are important over Portugal. The numerical models applied in the case studies have proven to be a valuable tool to justify non-photochemical ozone high concentrations at surface. This phenomenon may be enhanced in climate change scenarios.

Air quality studies over Portugal in a combined emission-climate scenario for 2050, for meteorological conditions associated with photochemical formation, have shown worst results than in present climate, for ozone and especially for nitrogen dioxide. The aggravation of the well-connected code of the fire weather index with the burned area, the drought code, allow to say that in future climate scenario atmospheric emissions of the biomass burning may increase.

It is the author hope that the work here presented, associated to others in climate change applications, may contribute as valuable information when structuring activities are planned by decision makers, due to their implications on atmospheric emissions and their consequences on a global and regional scale.

Cartoon da capa da autoria de Clay Bennett: [http:// http://www.claybennett.com/](http://http://www.claybennett.com/)

*Todo o Mundo é composto de mudança,
Tomando sempre novas qualidades.*

...

*E, afora este mudar-se cada dia,
Outra mudança faz de mor espanto:
Que não se muda já como soía.*

Luiz Vaz de Camões

Índice

1	Introdução	1
2	O sistema climático e as alterações no clima	11
2.1	Componentes do sistema climático.....	11
2.2	Composição química da atmosfera e o efeito de estufa.....	17
2.3	O ozono como gás de efeito de estufa e a sua interacção com o clima.....	24
2.4	Alterações da composição química da atmosfera: cenários futuros de emissões	26
3	Modelação numérica e estimativa de emissões.....	31
3.1	O modelo meteorológico MM5	31
3.2	O modelo de qualidade do ar CAMx	36
3.3	Estimativa de Emissões	43
4	O ozono na baixa troposfera em Portugal.....	51
4.1	Medições de ozono, um pouco de história.....	52
4.2	Climatologia de variáveis meteorológicas e de qualidade do ar.....	58
4.2.1	Caracterização do padrão anual de poluentes fotoquímicos	59
4.2.2	Correlação entre parâmetros de qualidade do ar e de estabilidade atmosférica	65
4.3	Tendências de ozono e seus precursores em Portugal	70
5	Intrusões de ozono estratosférico na baixa troposfera em Portugal	85
5.1	Mecanismos de troca de massas de ar entre a estratosfera e a troposfera.....	86
5.2	Ocorrências em Portugal: casos de estudo.....	92
5.2.1	Simulação e análise do episódio 1: Coimbra, Janeiro de 1996	92
5.2.2	Simulação e análise do episódio 2: Coimbra, Dezembro de 1997	103
5.2.3	Simulação e análise do episódio 3: Madrid, 29 de Abril 2000.....	108
5.2.4	Simulação e análise do episódio 4: Portugal, Maio de 2001.....	121
6	Alterações climáticas em Portugal	129
6.1	Impacte na qualidade do ar	133
6.1.1	Inventário de emissões	134

6.1.2	Cenários globais do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC)	135
6.1.3	Metodologia - Energia.....	137
6.1.4	Metodologia - Emissões.....	142
6.1.5	Metodologia - Modelação de parâmetros meteorológicos e da qualidade do ar ..	146
6.1.6	Simulação da qualidade do ar	150
6.2	Impacte no índice meteorológico de risco de incêndio.....	160
6.2.1	O índice meteorológico de risco de incêndio Fire Weather Index (FWI)	160
6.2.2	Previsões do índice meteorológico de risco de incêndio.....	163
6.2.3	Seleção dos períodos de interesse a simular.....	165
6.2.4	Estimativa do FWI para clima actual e clima futuro.....	167
7	Conclusões	175
	Referências bibliográficas	181
	Anexo I: Índices de estabilidade atmosférica	
	Anexo II: Estabilidade atmosférica e qualidade do ar: coeficientes de correlação	
	Anexo III: Concentrações de ozono em Madrid, Espanha: hipótese de intrusão estratosférica	

Índice de Figuras

Figura 2.1: Sistema climático (adaptado de IPCC, 2001).	12
Figura 2.2: Escalas temporais características das componentes do sistema climático e alguns factores externos forçadores do sistema (adaptado de Peixoto e Oort, 1992).	13
Figura 2.3: Esquema da máquina térmica atmosférica (MT) e da bomba estratosférica (B) Linhas a ~: fluxos de energia radiante; -: fluxos de calor; --: fluxos de energia mecânica (adaptado de McIlveen, 1998).	14
Figura 2.4: Variação da pressão em superfície isentrópica em condições baroclínicas (Salby, 1996).	16
Figura 2.5: Estrutura térmica correspondente a: a) estratificação barotrópica, em que as superfícies isentrópicas e as superfícies isobáricas são coincidentes e a energia potencial disponível é nula; e b) estratificação baroclínica, onde as superfícies isentrópicas e isobáricas não são coincidentes e a energia potencial disponível é positiva (Salby, 1996).	16
Figura 2.6: Absorção de energia por gases de efeito de estufa e pela atmosfera (Ahrens, 2003). ...	17
Figura 2.7: Balanço energético Terra-Atmosfera (Ahrens, 2003).	19
Figura 2.8: Processos essenciais que afectam a formação e o destino de compostos químicos na troposfera (Brasseur <i>et al.</i> , 2003).	20
Figura 2.9: Esquema dos principais mecanismos químicos presentes na atmosfera (Brasseur <i>et al.</i> , 2003).	22
Figura 2.10: Variação da temperatura, concentração de metano e de dióxido de carbono na atmosfera inferidos a partir de ar contido em gelo da Antárctica (IPCC, 2001).	23
Figura 2.11: Ilustração esquemática dos cenários SRES, onde CH = cenário harmonizado, OC = outros cenários (adaptado de IPCC, 2000).	28
Figura 3.1: Módulos do sistema de modelação MM5.	32
Figura 3.2: Interação directa entre as parametrizações físicas do MM5.	36
Figura 3.3: Relação entre a resolução espacial e temporal entre domínios de malha com resolução grosseira e fina.	39
Figura 3.4: Representação esquemática da localização do cálculo das diferentes variáveis em diferentes tipos de malha Arakawa (Griffies <i>et al.</i> , 2000).	41
Figura 3.5: Emissões de NO _x em toda a Europa, ano 2000 (unidades Mg NO ₂ ano ⁻¹), (URL 7).	44
Figura 3.6: Distribuição espacial das grandes fontes emissoras (pontuais).	45

Figura 3.7: Emissão total anual de (a) NO_x sobre a Península Ibérica, resolução 30 km x 30 km e (b) COVNM sobre Portugal, 10 km x 10 km, em 2001.	47
Figura 4.1: Distribuição vertical de ozono na atmosfera (adaptado de WMO, 1998).	51
Figura 4.2: Registos fotográficos do <i>smog</i> fotoquímico a) em Los Angeles, 1943 (URL 9) e b) Londres, 1951 (URL 11).	52
Figura 4.3: Comparação de concentração de ozono à superfície entre 1876-1907, em Montsouris, com medições em Arkona (costa do Mar Báltico da antiga República Democrática Alemã, entre 1956-1982), Graedel e Crutzen, 1993.	53
Figura 4.4: Médias anuais de ozono em estações de qualidade do ar rurais-linha preta, urbanas-linha azul e de artérias principais- linha verde (EEA, 2004).	56
Figura 4.5: Máximos de concentrações de ozono horárias, em estações rurais (onde AT=Austria, BE=Bélgica, FI=Finlândia, NL=Holanda, CH=República Checa e UK= Reino Unido) (EEA, 2004).	56
Figura 4.6: Emissão de gases precursores de O_3 entre 1990 e 2000 pela Europa dos 15 e tecto de emissão de COVNM e NO_x em 2010 (EEA, 2004).	57
Figura 4.7: Médias anuais das concentrações horárias de NO_2 em estações de qualidade do ar rurais-linha preta, urbanas-linha azul e de artérias principais- linha vermelha (EEA, 2004)...	57
Figura 4.8: Média e desvio padrão de concentração de NO para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.	61
Figura 4.9: Média e desvio padrão de concentração de NO_2 para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.	62
Figura 4.10: Média e desvio padrão de concentração de CO para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.	63
Figura 4.11: Média e desvio padrão de concentração de O_3 para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.	64
Figura 4.12: Área de Portugal coberta pelas circunferências de raios 200 e 300 km centradas em Lisboa.	65
Figura 4.13: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelho) de CO.	71
Figura 4.14: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelhos) de NO.	73
Figura 4.15: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelho) de NO_2	74
Figura 4.16: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelho) de O_3	75
Figura 4.17: Contribuição de cada componente temporal na variação da concentração de ozono nas séries de 1999-2004, inclusive.	78

Figura 4.18: Componente de tendência obtida por aplicação dos filtros KZ.	81
Figura 5.1: Trajectórias conceptuais de ar estratosférico de Danielsen (Johnson e Viezee, 1981)..	86
Figura 5.2: Mecanismos de transporte hipotéticos do ozono estratosférico na troposfera (Johnson e Viezee, 1981).	87
Figura 5.3: Perturbações ciclónicas e anticiclónicas de larga escala (Brasseur <i>et al.</i> , 1999).	88
Figura 5.4: Diagrama conceptual de uma secção transversal da corrente de jacto associada a uma frente na troposfera alta; a) linhas finas = isentrópicas, linha grossa = tropopausa, sombreados correspondem à velocidade do vento, cinza claro $\geq 50 \text{ m.s}^{-1}$; cinza médio $\geq 75 \text{ m.s}^{-1}$ e cinza escuro $\geq 100 \text{ m.s}^{-1}$; b) circulações dinâmicas transversais associadas à mesma frente (Stull, 2000).	88
Figura 5.5: Vorticidade potencial isentrópica a 400 hPa em unidades UPV, no dia 15 de Outubro 1993, às 00H00 UTC e temperatura potencial nas secções verticais dos cortes AB. a) Dados do ECMWF; b) resultados do MM5 (Elbern <i>et al.</i> , 1998).	92
Figura 5.6: Concentração mensal média de ozono em Coimbra.	93
Figura 5.7: Domínios do MM5 usados nas simulações de episódios seleccionados.	95
Figura 5.8: Isosuperfície de vorticidade potencial isentrópica de 1,5 UPV a 9 de Janeiro de 1996 às 00H00, 06H00 e 13H00 UTC (o círculo indica a localização da Península Ibérica).	96
Figura 5.9: Afundamentos da tropopausa dinâmica sobre o Atlântico Norte em 12, 14, 15 e 17 de Janeiro de 1996, às 11H00, 18H00, 06H00 e 02H00 UTC, respectivamente.	97
Figura 5.10: Coluna total de ozono medida sobre o Hemisfério Norte nos dia 9, 11, 13 e 15 de Janeiro de 1996 (URL 19).	98
Figura 5.11: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam ao ponto de latitude/longitude (40,2°N ; 8,5°W). a) valores de pressão durante do trajecto; b) valores de humidade relativa durante o trajecto.	99
Figura 5.12: Linhas de corrente e UPV num plano vertical sobre o domínio 3 à latitude de 40,16 ° N, visto de Sul.	99
Figura 5.13: Evolução das concentrações de ozono em superfície em Coimbra simuladas para o período entre 11 e 18 de Janeiro de 1996.	100
Figura 5.14: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam ao ponto de latitude/longitude (40,2°N;8,5°W) - Coimbra - no dia 5 de Janeiro de 1996, às 12H00 UTC. Valores de humidade relativa durante o trajecto.	101
Figura 5.15: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam aos pontos de latitude/longitude de a) Coimbra; b) Monte Chãos e c) Monte Velho no dia 9 de Janeiro de 1996, às 12H00 UTC. Valores de humidade relativa durante o trajecto.	102
Figura 5.16: Concentração de ozono em medidas na rede de qualidade do ar, entre 23 e 28 de Dezembro de 1997.	103
Figura 5.17: Coluna total de ozono medida sobre o Hemisfério Norte nos dia 18 e 24 de Dezembro de 1997 (URL 19).	104
Figura 5.18: Instantes do início (23 de Dezembro, às 20H00 UTC) e máximo (24 de Dezembro, às 00H00 UTC) do afundamento detectado no período de simulação.	105

Figura 5.19: Vista de Oeste, em duas perspectivas, da intersecção das superfícies isentrópica de 305 K e da isosuperfície de vorticidade potencial isentrópica de 1,5 UPV às 00H00 UTC de 24 de Dezembro de 1997.	106
Figura 5.20: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam ao ponto de latitude/longitude (40,2°N;8,5°W). a) valores de pressão durante o trajecto; b) valores de humidade relativa durante o trajecto.	107
Figura 5.21: Representação tridimensional da humidade relativa e altitude correspondente às partículas associadas às três trajectórias que chegam a Coimbra a 26 m (TRAJECTÓRIA 1), 500 m (TRAJECTÓRIA 2) e 1000 m (TRAJECTÓRIA 3).	107
Figura 5.22: Estações de qualidade do ar da Rede de Monitorização da Comunidade de Madrid, Espanha (URL 21).	108
Figura 5.23: Localização dos lançamentos de radiossondagens (URL 22).	109
Figura 5.24: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 25 Abril 2000 às 12H00 UTC.	110
Figura 5.25: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 26 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.	111
Figura 5.26: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 27 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.	112
Figura 5.27: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 28 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.	113
Figura 5.28: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 29 de Abril de 2000, às 00H00 UTC.	114
Figura 5.29: Retrotrajectórias das partículas, calculadas pelo KNMI, que chegam a Madrid (40.5°N 3.7°W) no dia 29 de Abril de 2000 às 06H00 UTC nos níveis 850, 875, 900 e 909 hPa. Em cima: representação horizontal com posição (●) em intervalos de 3 horas. Dia/hora a azul e nível de pressão (em hPa) a vermelho (em intervalos de 12 horas) para o nível 909 hPa. Em baixo: representação vertical (Borrego <i>et al.</i> , 2005b).	116
Figura 5.30: Retrotrajectórias das partículas, calculadas pelo KNMI, que chegam a Madrid (40.5°N 3.7°W) e a 4 localizações vizinhas (0.2° a norte, a sul, a oeste e a leste) no dia 29 de Abril de 2000 às 00H00 UTC, no nível 850 hPa (em cima) e 900 hPa (em baixo) (Borrego <i>et al.</i> , 2005b).	117
Figura 5.31: Coluna total de ozono sobre o hemisfério Norte em a) 25 b) 26 c) 27 e d) 28 de Abril de 2000 (URL 19).	118
Figura 5.32: Vorticidade potencial isentrópica, a cuja superfície corresponde a legenda de altura de geopotencial e isentrópica de 305 K a) vista do “interior” da terra; b) vista de Oeste.	119
Figura 5.33: Vorticidade potencial isentrópica, a cuja superfície corresponde a legenda de altura de geopotencial e isentrópica de 305 K a) dia 27 de Abril às 12H00 UTC; b) dia 28 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.	120
Figura 5.34: Representação tridimensional da humidade relativa e altitude correspondente às partículas associadas às três trajectórias que chegam à latitude-longitude de Madrid a 700 m (TRAJECTÓRIA 1), 1500 m (TRAJECTÓRIA 2) e 2000 m (TRAJECTÓRIA 3).	120

Figura 5.35: Evolução temporal das concentrações de ozono nas estações de fundo de Ermesinde (Norte), Avanca (Centro) e Monte Velho (Costa Alentejana) no período de 27 a 29 de Maio 2001.....	122
Figura 5.36: Campo de concentrações de ozono, rumo e velocidade do vento à superfície nos dias 27 e 28 de Maio, às 14H00 UTC.....	122
Figura 5.37: Campos de pressão à superfície e altura de geopotencial aos 500 hPa, às 12H00 UTC dos casos de estudo apresentados (Borrego <i>et al.</i> , 2005b).	125
Figura 6.1: Simulação das anomalias de temperatura na Terra (°C) e comparação com valores observados em três situações de forçamentos a) naturais, b) antropogénicos e c) ambos, (IPCC, 2001).	129
Figura 6.2: Campos de anomalias de temperatura em 2050, simulados pelos modelos de circulação geral HadCM3 e NIES99, para os cenários SRES A1F e B2a (URL 23).	130
Figura 6.3: Processos físicos e químicos envolvidos no balanço de ozono troposférico (adaptado de UE, 2003).	131
Figura 6.4: Metodologia de cálculo de emissões para o ano 2050.	134
Figura 6.5: Ilustração esquemática dos cenários SRES (adaptado de IPCC, 2000).	137
Figura 6.6: Consumo de energia primária e contribuição das diferentes fontes até 2050, para Portugal.	139
Figura 6.7: Fontes de energias renováveis em 2050.	140
Figura 6.8: Distribuição da energia consumida por cada sector de actividade em 2050.	142
Figura 6.9: Evolução da composição energética nas fontes de emissão em área.	143
Figura 6.10: Evolução do indicador de emissão anual (ton.TJ ⁻¹) para COVNM, NO _x e CH ₄	143
Figura 6.11: Cascata de modelos usada na análise da qualidade do ar.	147
Figura 6.12: Selecção de um episódio representativo de episódio médio para cada clima.	149
Figura 6.13: Localização das estações da qualidade do ar.	150
Figura 6.14: Mediana e quartis dos resultados de O ₃ para os episódios de cenário climático actual e futuro.	153
Figura 6.15: Mediana e quartis dos resultados de NO ₂ para os episódios de cenário actual e cenário futuro.	154
Figura 6.16: Mapas de diferenciais (µg.m ⁻³), entre cenário futuro e cenário actual, das médias das concentrações simuladas de ozono.	156
Figura 6.17: Mapas de diferenciais (µg.m ⁻³), entre cenário futuro e cenário actual, das médias das concentrações simuladas de dióxido de azoto.	158
Figura 6.18: Estrutura do sistema Canadano de indexação de perigo de incêndio (Viegas <i>et al.</i> , 2004).	161
Figura 6.19: Localização das células do modelo global MUGCM usadas no cálculo do DC.....	164
Figura 6.20: Média e desvio padrão dos índices DC calculados para Coimbra e simulados pelo MUGCM para o cenário climático actual.	165

Figura 6.21: Estimativa do DC para o clima actual.	166
Figura 6.22: Estimativa do DC para o clima futuro.	166
Figura 6.23: Simulação seleccionada como representativa da média do clima presente.	167
Figura 6.24: Simulação seleccionada como representativa da média do clima futuro.	167
Figura 6.25: Evolução do DC para as séries obtidas pelo modelo MM5 e comparação com valores baseados em observações.	168
Figura 6.26: Histogramas das componentes do índice Canadano.	170
Figura 6.27: Valores de DC máximos em cenário de clima actual e de clima futuro.	171

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Composição da atmosfera (Salby, 1996).....	18
Tabela 2.2: Evolução da concentração e tempo de residência de gases de efeito de estufa na atmosfera (IPCC, 2001).....	23
Tabela 2.3: Impacte de alterações em processos relacionados com o clima nos níveis de ozono (UE, 2003).	26
Tabela 3.1: Fontes de dados de elevação do terreno*	33
Tabela 3.2: Dados de entrada do CAMx (ENVIRON, 2004).	38
Tabela 3.3: Processos presentes no CAMx e respectivos modelos físicos.....	39
Tabela 3.4: Termos da equação da continuidade de cada espécie química.	40
Tabela 3.5: Factores socio-económicos usados na desagregação espacial das emissões em área (Monteiro <i>et al.</i> , 2001).	46
Tabela 4.1: Estações de monitorização de qualidade do ar seleccionadas.	58
Tabela 4.2: Parâmetros de estabilidade atmosférica e seu significado físico (Leitão <i>et al.</i> , 2004). .	66
Tabela 4.3: Resumo dos resultados de correlações entre a estabilidade atmosférica e a qualidade do ar.....	68
Tabela 5.1: Concentrações de ozono superiores a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ em Janeiro de 1996 em Portugal.....	93
Tabela 5.2: Definição dos domínios de simulação.....	94
Tabela 5.3: Coordenadas geodésicas das estações de radiossondagens.	109
Tabela 6.1: Indicadores energéticos de emissão e totais nacionais de emissão calculados para 2050.	144
Tabela 6.2: Índice multiplicativo de evolução populacional 2000-2050 NUTII.....	144
Tabela 6.3: Quilometragem por categoria de veículo.	145
Tabela 6.4: Indicadores energéticos de emissão anuais por poluente e por categoria de veículo (ton.TJ ⁻¹ petróleo).....	145
Tabela 6.5: Totais nacionais de emissão por poluente no presente e em 2050 (ton).....	146
Tabela 6.6: Características dos cenários climáticos simulados (Carvalho, A., 2002).	148
Tabela 6.7: Concentrações médias de O ₃ e desvio padrão, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, por episódio simulado.	151
Tabela 6.8: Concentrações médias de NO ₂ e desvio padrão, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, por episódio simulado. .	151

Tabela 6.9: Classes de perigo e área máxima consumida por incêndio (Cruz, 2000).	162
Tabela 6.10: Classes de perigo e limites de classe para cada componente do FWI (Cruz, 2000)..	163
Tabela 6.11: Valores limite das classes de perigo para os distritos de Porto, Coimbra e Évora (Viegas <i>et al.</i> , 2004).	163

Abreviaturas e símbolos

Abreviaturas

AOT40 - Valor limite para a protecção dos ecossistemas relativamente ao ozono (Accumulated dose over a threshold of 40 ppb)

AT - Áustria

AVA - Estação de qualidade do ar de Avanca

B - Bomba estratosférica

BE - Bélgica

BRCH - Número de Richardson “Bulk” (Bulk Richardson number)

BUI - Índice de combustível disponível

CAPE – Energia Potencial Disponível para convecção (Convective Available Potential Energy)

CH – República Checa

COI - Estação de qualidade do ar de Coimbra

CORINAIR/EMEP - CO-ordinated INFORMATION on the Environment in the European Community – AIR

DC - Índice de secura

DGE – Direcção Geral da Energia

DGF – Direcção Geral de Florestas

DL – Decreto-lei

DMC - Índice de humidade da camada orgânica

ECMWF - Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting)

EEA – Agência Europeia do Ambiente (Environmental European Agency)

EMEP – Programa Europeu de Monitorização e Avaliação (European Monitoring and Evaluation Programme)

ENT - Estação de qualidade do ar de Entrecampos

ERM – Estação de qualidade do ar de Ermesinde

FEU - Estação de qualidade do ar da Rua dos Bragas (outrora Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

FFMC - Índice de humidade dos combustíveis finos

FI - Finlândia

FOR - Estação de qualidade do ar da Rua formosa

FR – França

FWI – Índice perigo de risco meteorológico de incêndio (Fire Weather Index)

GCM – Modelo climático global (Global Climate Model)

GEE – Gases de efeito de estufa

GTOPO30 – Modelo de elevação digital global com 30 segundos de resolução horizontal.

HVE - Estação de qualidade do ar do Hospital Velho

IA – Instituto do Ambiente

IIASA – Instituto Internacional para a análise aplicada de sistemas (International Institute for Applied Systems Analysis)

INE – Instituto Nacional de Estatística

IPCC – Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)

ISI - Índice de propagação inicial

IT – Itália

KI - index K

LI - index ascensional (Lifted Index)

M - Energia mecânica

MCH - Estação de qualidade do ar de Monte Chãos

MIE – Ministério da Indústria e Energia

MT - Máquina térmica atmosférica

MUGCM – Modelo Climático Global da Universidade de Melbourne, Austrália (Melbourne University Global Climate Model)

MVE - Estação de qualidade do ar de Monte Velho

NAO – Índice de Oscilação do Atlântico Norte

NL - Holanda

NUT – Nomenclatura de Unidades Territoriais

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PSU/NCAR – Universidade Estatal da Pensilvânia/Centro Nacional para a pesquisa da atmosfera (Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research), nos Estados Unidos da América

P_{sup} – Pressão superficial

PT - Portugal

Q - Calor

QBO – Oscilação quasi-bianual (Quasi-Biennial Oscillation Index)

SCA - Estação de qualidade do ar de Santiago do Cacém

SP - Espanha

SRES – Special report on emission scenarios

SST – Temperatura da superfície do mar

SWI - index showalter

T - Temperatura

UE – União europeia

UK – Reino Unido

URL - Uniform Resource Locator

USGS – United States Geological Survey

UTC – Tempo coordenado Universal

Símbolos

ρ - massa volúmica atmosférica

η - taxa de *entrainment* vertical

A_l - é a taxa de deposição húmida da espécie l

Δt - passo temporal

A_{yz} e A_{xz} - as secções verticais dos planos XY e XZ, respectivamente

c_l - concentração da espécie l

DU - componente diurna componente

E_l - taxa de emissão da espécie química l

h - altura vertical de interface

ID – componente intradiária

K - coeficiente de difusão turbulenta

LT - componente de longo termo
 m - factor de distância
N – Frequência de Nyquist
S - componente sazonal
SY - componente sinóptica
 u e v - componentes zonais e meridionais do vento
 V_H - vector horizontal do vento

Símbolos de elementos, compostos e conjunto de compostos químicos

Ar – Árgon
 CF_4 - Tetrafluormetano
CFCs - Clorofluorcarbonetos
 CH_4 - Metano
 CO_2 – Dióxido de Carbono
COV – Compostos Orgânicos Voláteis
COVNM - Compostos Orgânicos Voláteis Não metano
 H_2O - Água
 H_2O_2 – Peróxido de hidrogénio
 H_2SO_4 – Ácido sulfúrico
HFCS - Hidrofluorcarbonetos
 HNO_3 – Ácido nítrico
 HO^\bullet – Radical hidróxilo
 HO_2^\bullet - Radical hidroperóxilo
 N_2 – Azoto molecular
 N_2O – Óxido nitroso
NO – Óxido de azoto
 NO_2 – Dióxido de azoto
 NO_3^\bullet – Radical trióxido de azoto
 NO_x – Óxidos de azoto
 $\text{O}(^1\text{D})$ – Oxigénio atómico no estado de singlete
 O_2 – Oxigénio molecular

O_3 – Ozono

SO_2 – Dióxido de enxofre

$(\text{CH}_3)_2\text{S}$ – Sulfureto de dimetilo

Capítulo 1

1 Introdução

O Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPPC), no seu terceiro relatório de avaliação (IPCC, 2001), evidenciou a importância da química da atmosfera no controlo da composição de gases de efeito de estufa (GEE) na atmosfera e o papel que o ozono troposférico tem como gás de efeito de estufa à escala global. Actualmente encontra-se entre os três principais compostos a contribuir de forma positiva no forçamento radiativo global, juntamente com o dióxido de carbono e o metano. Contudo, a sua distribuição na atmosfera não é homogénea, e na troposfera em particular, porque, não sendo um composto emitido directamente por qualquer fonte, é dependente das emissões dos seus gases precursores (UE, 2003).

A avaliação do impacto das alterações climáticas na qualidade do ar é um assunto de grande complexidade e relevância científica devido à profusão de escalas, espaciais e temporais, dos vários factores necessários ao seu estudo a considerar, como por exemplo, o clima, a meteorologia e as emissões. A estimativa da resposta do clima no futuro depende da quantificação das emissões de GEE, resultantes de hipóteses aceites para o desenvolvimento das sociedades, consideradas globalmente. Os gases que regulam o efeito de estufa e que se encontram quantificados no quadro do Protocolo de Quioto (o texto integral pode ser consultado em URL 1) são os que derivam directamente das actividades antropogénicas e biogénicas: o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4), o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os hidrofluorcarbonetos (HFCs) e os hidrocarbonetos perfluorados (PFCs). Porém, estes não são os únicos gases a influenciar a temperatura média à superfície da terra. A Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC) apresenta também as quantificações de emissões de dióxido de enxofre (SO_2), compostos orgânicos voláteis não metano (COVNM) e de monóxido de carbono (CO) pela sua influência indirecta no efeito de estufa. Por outro lado, é interessante analisar a qualidade do ar à escala do indivíduo, ou seja, à escala dos aglomerados urbanos onde as pessoas se movimentam e se expõem a gases que lhes podem ser prejudiciais. Neste caso, dever-se-á ter em consideração como se irá desenvolver a sociedade de um determinado país, o que conduz à regionalização de cenários de emissões de poluentes atmosféricos, e de que forma a evolução destes cenários nacionais se compatibiliza com os impostos ao forçamento climático. Este aspecto torna-se relevante no sentido em que os gases emitidos a nível regional, e com impacto na qualidade do ar, não têm um potencial directo como gás de estufa, mas têm potencialidade de os produzir,

nomeadamente os óxidos nitrosos e os compostos orgânicos voláteis (que não são considerados como gases de estufa) e o ozono (um importante GEE, como referido anteriormente). Contudo, embora o ozono troposférico contribua positivamente para o balanço radiativo, a sua concentração é controlável numa escala temporal inferior à dos restantes GEE e para a qual é difícil atribuir responsabilidade na emissão, dado o seu carácter de poluente secundário.

A avaliação da qualidade do ar, actual e em cenários futuros, assenta frequentemente em modelos numéricos que o tempo tem indicado serem imprescindíveis na explicação dos factores que possam estar nela implicados. A aplicação de modelos climáticos globais no estudo da resposta climática a diferentes estimativas de emissões globais constitui um exemplo da manipulação de condições iniciais e de fronteira como um dos factores em causa. Apesar dos desenvolvimentos na capacidade de cálculo terem sido importantes nos últimos anos, as aplicações de modelos climáticos de elevada resolução apenas são possíveis sobre pequenas regiões do globo. O acoplamento de modelos químicos da atmosfera aos modelos climáticos impõe restrições que limitam a resolução dos estudos de alteração da composição da atmosfera. Deste modo, a análise da qualidade do ar à escala regional tem feito uso de cascatas de modelos, compostas por modelos climáticos, meteorológicos e da química da atmosfera, o que introduz mais um elemento a ter em conta nas incertezas associadas a este tipo de estudos.

O ozono troposférico apresenta padrões bastante regionalizados, mas com um efeito global não desprezável em termos da regulação da temperatura. A interacção entre o ozono e o clima tem sido objecto de múltiplos estudos (veja-se para tal os resultados compilados em UE, 2003 e Brasseur *et al.*, 2003). Sendo este um assunto relevante no estudo das alterações climáticas, o IPCC pretende incluir no seu Quarto Relatório de Avaliação, com publicação prevista para 2007, algumas respostas em termos globais no que se refere à distribuição das concentrações de ozono considerando diferentes cenários de clima futuro. Assim, estão programadas aplicações à escala global (Gauss *et al.*, 2005) de várias condições de simulação previstas para 2030, integrando as emissões calculadas recentemente pelo *International Institute for Applied Systems Analysis* – IIASA e as condições meteorológicas simuladas para o ano de 1990 e para o ano 2020. Os pressupostos assumidos pelo IIASA incluem as perspectivas de crescimento de cada país e a legislação actual relacionada com o controlo de poluição. Nestes cenários, a quantidade de precursores de ozono é inferior às emissões resultantes de qualquer um dos cenários desenvolvidos para o *Special Report on Emission Scenarios* - SRES (IPCC, 2000), por outro lado, não contemplam qualquer emissão decorrente da actividade biogénica. Os resultados preliminares dos modelos globais acoplados de química e transporte indiciam que a utilização de melhor tecnologia de redução de emissões diminui o forçamento radiativo entre o ano de 1990 e o ano 2020. Em termos de qualidade do ar, os resultados obtidos apontam uma melhoria desta devido à limitação das emissões de CH₄. O mesmo efeito não se verifica quando se controlam as emissões de óxidos de azoto (NO_x); ao diminuir as emissões deste poluente a qualidade do ar melhora contudo o forçamento radiativo poderá intensificar-se.

Em termos Europeus, existem alguns resultados de estudos aplicados à temática da interação entre a qualidade do ar e as alterações climáticas. As aplicações formalizadas neste âmbito têm-se baseado em cenários de emissões, por parte de cada país, que resultam da imposição de tectos de emissões tendo como base a legislação comunitária no que se refere a poluentes acidificantes e ao ozono à superfície (Directiva nº 2001/81/CE) e, ainda, os compromissos assumidos pela União Europeia no âmbito do Protocolo de Quioto no que concerne aos GEE.

Os trabalhos desenvolvidos por Zlatev (2002) e Langner *et al.* (2005) constituem exemplos de resultados obtidos no estudo da interação entre clima e qualidade do ar à escala europeia. Com base apenas nas variações de temperatura, cobertura nebulosa, precipitação e humidade previstas por um dos cenários SRES, que tem por hipótese um mundo heterogéneo assente numa economia regional, Zlatev aplicou o Modelo Euleriano Dinamarquês na avaliação das alterações na qualidade do ar sobre a Dinamarca, com um domínio estendido a quase toda a Europa. Os dados de emissões utilizados dizem respeito ao ano de 1989, tanto na simulação de referência como na de clima alterado, avaliando-se desta forma apenas o impacto das variações dos parâmetros meteorológicos enumerados na produção fotoquímica. Recentemente, Langner *et al.* (2005) publicaram resultados que pretendiam responder à pergunta: será que as variações do clima, *per si*, melhorarão ou piorarão a qualidade do ar na Europa? Para tal, usaram uma cascata de modelos, constituída por um modelo climático global, um modelo meteorológico e um modelo químico, ambos regionais, não tendo sido feita qualquer extrapolação das emissões antropogénicas ou das condições fronteira consideradas pelo modelo químico em cenário de clima futuro. Como condições fronteira ao modelo regional foram impostos os resultados de dois modelos globais. As emissões antropogénicas calcularam-se para o ano de 1996 e os resultados dos modelos globais considerados tiveram por base o cenário *business as usual* entre 2050 e 2070. Os impactos mostram a sensibilidade existente por parte dos modelos químicos em relação aos padrões de precipitação, nomeadamente na deposição de poluentes e na produção do radical hidróxilo (OH^\bullet). Este último estudo faz referência ao Sul da Europa, em que Portugal está representado apenas na sua parte Norte-Centro, referindo aumentos nas médias de máximos diários e no índice que relaciona o impacto acumulado do ozono na vegetação, designado comumente por AOT40 – *Accumulated dose over a threshold of 40 ppb* (ver definição de AOT40 em Fuhrer *et al.*, 1997).

Hogrefe e colaboradores (2004) apresentaram resultados para a zona Este dos Estados Unidos da América baseados num conceito de modelação semelhante a Langner *et al.* (2005). Neste caso, analisaram-se não só os impactos das alterações climáticas globais na qualidade do ar como também a contribuição quer das variações consideradas nas condições fronteira quer do aumento de emissões antropogénicas em 2050. Os parâmetros avaliados são sensíveis a diferentes causas: enquanto o máximo da média móvel diária de oito horas estival responde mais a variações nas condições fronteira impostas ao modelo fotoquímico regional, o quarto valor mais alto desta média é mais influenciado pelas variações ocorridas no clima regional.

A influência de factores de variabilidade climática interanual nas condições meteorológicas de meso-escala em regiões de Portugal foram estudadas por Carvalho *et al.* (1997) e Barros *et al.* (1995) e constituem um exemplo das primeiras abordagens de regionalização, sobre regiões do nosso país, de condições climáticas globais. No primeiro estudo pretendia-se avaliar como as condições de El Niño se repercutiam nas variáveis meteorológicas propícias ao aumento da severidade dos incêndios florestais enquanto que o segundo estudo se orientou para o impacte dessas condições na qualidade do ar. Os resultados de trabalhos mais orientados para a avaliação do impacte das alterações climáticas na qualidade do ar apareceram mais tarde e incluem os que foram obtidos no Projecto IGLO - *Impacte das Alterações Climáticas Globais no Ambiente Atmosférico do Atlântico Norte e Península Ibérica* (Borrego *et al.*, 2000a e Carvalho *et al.*, 2001), no Projecto SIAM - *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation Measures* (Santos *et al.*, 2002) e em Salmim (2005). O projecto IGLO foi um dos primeiros a versar a temática das alterações climáticas e seus impactes no nosso país, nomeadamente na qualidade do ar e no risco meteorológico de incêndio florestal. Teve em consideração a meteorologia associada a padrões globais de clima em cenário futuro e as emissões antropogénicas resultantes de aumentos percentuais, em relação às de 1990, assumidos por Portugal para cumprimento do Protocolo de Quioto. Esta percentagem resulta das negociações com a União Europeia, em que Portugal está autorizado a aumentar as suas emissões de CO₂ equivalente em 27 % até 2008-2012, relativamente às emissões de 1990.

Do trabalho desenvolvido no projecto IGLO resultou a análise de ciclos diários de produção de ozono fotoquímico e as suas possíveis alterações em cenário de clima futuro. A avaliação foi feita sobre as regiões de Lisboa, Porto e Aveiro, no Verão e no Inverno. Os padrões apresentaram-se diferentes nas duas regiões metropolitanas, em ambas as estações do ano, em relação à região de Aveiro. Lisboa e Porto mostraram apenas um pico bem definido perto do meio-dia, enquanto Aveiro apresentou dois máximos, o mais intenso pela manhã e o segundo a meio da tarde, evidenciando a influência da produção local e de transporte nas concentrações de ozono nesta região. Estes primeiros resultados apontaram algumas melhorias a ser introduzidas em estudos de alterações climáticas e de qualidade do ar. Nomeadamente, o aumento do detalhe das condições existentes na camada limite e a elaboração de estimativas das emissões antropogénicas que obedeçam a hipóteses de extrapolação com base no crescimento de factores socio-económicos.

Numa perspectiva de impacte na saúde humana, Santos *et al.*, (2002) analisaram dados históricos das concentrações de dióxido de azoto (NO₂) e ozono (O₃) na cidade de Lisboa e relacionaram-nas com a temperatura máxima e percentagem de dias com baixas velocidades de vento. Os resultados tiveram como base a extrapolação das condições meteorológicas associadas a registos de concentrações elevadas de NO₂ e O₃, em Lisboa. Segundo estes autores, as condições de aumento de temperatura máxima acima dos 25 °C e o aumento da frequência de ocorrência de ventos fracos em cenário de clima futuro induzirão um aumento das condições meteorológicas favoráveis à produção fotoquímica de ozono. Este estudo apenas inferiu qualitativamente possíveis variações das concentrações de ozono troposférico, com base em eventuais alterações na frequência de ocorrências de

padrões climáticos em Lisboa. Nada se assumiu com respeito às emissões de poluentes precursores de ozono.

A implementação de tectos de emissões em Portugal, com enquadramento legal pelo Decreto-Lei nº 193/2003, de 22 de Agosto, esteve na base da avaliação realizada por Salmim (2005). Nesta, estudaram-se os efeitos da implementação de cenários de redução de emissões nacionais nos precursores de gases acidificantes, impostos legalmente, na qualidade do ar em Portugal continental, mantendo constantes as condições meteorológicas. Como meteorologia de referência simularam-se as condições verificadas aquando de registos de concentrações elevadas de ozono, em vários dias e em várias estações, em Maio de 2001. Segundo os resultados obtidos, os cenários impostos pelos tectos de emissões têm como consequência uma melhoria da qualidade do ar relativamente ao ozono em superfície, dada a diminuição verificada nas suas concentrações, contrapondo as simulações efectuadas considerando as emissões de 2001.

Para além das emissões resultantes das actividades socio-económicas e biogénicas, a qualidade do ar é também afectada por emissões decorrentes de incêndios florestais, constituindo um factor não desprezável à escala global. No futuro e em termos globais, estima-se que a queima de biomassa possa vir a ser afectada pelo clima e as emissões de CH₄, COVNM, CO e NO_x dela resultantes poderão ter um impacte médio a grande nos níveis de ozono presentes na atmosfera (UE, 2003). Contudo, o impacte agudo das emissões dos incêndios florestais na qualidade do ar dá-se preferencialmente à escala regional e local por aumento das concentrações de O₃, NO_x, CO e matéria particulada e, sobretudo, pelo seu efeito na saúde humana (Viegas *et al.*, 2002; Miranda *et al.*, 2005).

Estudos realizados por Ladstätter-Wießenmayer *et al.* (2005) tendo como base imagens de satélite, correlacionaram positivamente os aumentos nos valores da coluna de ozono sobre a Indonésia, em Setembro de 1997, com os grandes incêndios que tiveram lugar nesse país no mesmo período. Segundo estes autores, o aumento de 50 DU (*Dobson Unit*) da coluna total de ozono na média de ozono mensal nesta região é devida à sua produção fotoquímica por precursores emitidos na queima de biomassa. Portugal apresenta também exemplos da interligação entre a ocorrência de incêndios florestais e o agravamento da qualidade do ar; nos últimos três anos a Rede Nacional de Qualidade do Ar registou alguns dias de ultrapassagens dos valores de concentração de ozono relativamente ao limiar de informação ao público de ozono em várias estações de qualidade do ar. Por exemplo, no ano de 2003 Portugal apresentou ultrapassagens ao limiar de informação ao público de ozono em 16 dias consecutivos, dias estes correspondentes à onda de calor registada em Portugal, em várias estações de qualidade do ar algumas das quais nunca haviam registado ultrapassagens a este limiar. Embora as emissões de gases precursores de ozono para atmosfera e as temperaturas elevadas que se fizeram sentir possam ter influenciado as concentrações de ozono registadas, suspeitou-se que estas estivessem directamente relacionadas com as emissões resultantes da queima de grandes extensões de floresta pois neste período vários foram os incêndios florestais cuja área ardida superou os 500 ha (DGF, 2003). Esta suspeita confirmou-se através dos resultados obtidos em estudos envolvendo um sistema de modelos numéricos de qualidade do ar aplicado à zona de influência da pluma dos incêndios ocorridos (Martins *et al.*, 2004 e Borrego *et al.* 2005a).

Este sistema de modelos foi desenvolvido por Miranda (2004) tendo como objectivo específico avaliar os efeitos das emissões resultantes dos incêndios florestais na qualidade do ar.

As condições meteorológicas influenciam não somente a produção fotoquímica de poluentes atmosféricos mas também a probabilidade de ocorrência de incêndios cujas emissões têm o potencial de aumentar as concentrações de ozono. As condições meteorológicas verificadas em diferentes escalas temporais têm efeitos na ocorrência e severidade de um incêndio florestal. Existem diferentes índices meteorológicos de risco de incêndio passíveis de serem prognosticados. Diversos estudos referentes à aplicação de índices variados em vários países europeus, incluindo Portugal, levaram a concluir que o Índice de Risco Canadano, conhecido como FWI (van Wagner, 1987), é o mais adequado (Viegas *et al.*, 2000).

O estudo do impacto das alterações climáticas na frequência e severidade dos incêndios florestais teve o seu início ainda no final dos anos 80 do Século XX com Beer *et al.* (1988) e Street (1989). Alguns desenvolvimentos surgiram nesta área na década seguinte, sobretudo no Canadá (Flannigan *et al.*, 1998 e Flannigan *et al.*, 2000; Stoks *et al.*, 1998), para além dos estudos incluídos no terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2001b). Os resultados compilados neste último estudo indicam uma alteração na frequência e intensidade dos extremos climáticos. Qualitativamente, prevê-se que as temperaturas máximas e mínimas aumentem os seus valores, com muita probabilidade associada, sendo estes acompanhados do aumento da frequência de dias com temperatura elevada. É também bastante provável um aumento de frequência de ondas de calor. A conjugação dos extremos de temperatura com a provável diminuição da humidade no solo e da disponibilidade de água no Verão faz com que aumente a probabilidade de ocorrência de incêndios florestais. Esta ocorrência estima-se vir a ser considerável no Sul da Europa, dada esta região, a par da zona Ártica, mostrar ter uma vulnerabilidade maior a estas variações no clima do que o restante continente Europeu.

Em consequência do acima exposto, espera-se um empobrecimento da qualidade do ar resultante de compostos emitidos pela queima de biomassa em incêndios florestais que venham a ocorrer. Uma vez que o índice meteorológico de risco de incêndio pode dar uma indicação da probabilidade de ocorrência deste, o conhecimento do modo como as alterações climáticas o irão influenciar, em termos de severidade e distribuição geográfica, poderá dar uma indicação da influência deste fenómeno na qualidade do ar regional.

Em Portugal existem já alguns estudos que abordaram esta questão. Em Carvalho (2002) e Carvalho *et al.* (2001) aplicaram-se índices de risco meteorológico de incêndio não cumulativos, os índices de Lourenço e de Angström, aos resultados de um modelo de meso-escala com uma malha de resolução horizontal de 5 km, inicializado com os dados de um modelo global (o Modelo de Circulação Geral da Universidade de Melbourne). Estes índices são bastante simples na sua aplicação, entrando apenas em linha de conta com a temperatura e a humidade do local em análise. Apesar da sua simplicidade, ambos dão uma indicação do agravamento do risco meteorológico de incêndio em cenário de clima em torno do ano 2050.

Em Santos *et al.* (2002) faz-se uso do índice de risco meteorológico de incêndio canadiano, o FWI, para a análise do impacto das alterações climáticas em condições de duplicação de CO₂ na atmosfera, para o ano 2100, em 10 localidades em Portugal. Para tal usaram-se os resultados do modelo regional do *Hadley Centre* (HadRM) com uma grelha de resolução horizontal aproximada de 50 km. As séries temporais obtidas respeitam ao período entre Maio e Outubro e apresentam um incremento considerável do risco meteorológico de incêndio em clima futuro, em todas as localidades. A variabilidade temporal parece aumentar em clima futuro bem como a época propícia aos incêndios.

Na presente tese, o trabalho desenvolvido teve como objectivo principal abordar, de uma forma integrada, o efeito das alterações climáticas na qualidade do ar em 2050, principalmente nos factores que possam vir a afectar as concentrações de ozono e, também dos seus precursores, em Portugal, sejam eles de carácter físico-químico ou dinâmico.

Assim, o Capítulo 2 enquadra a temática do objecto de estudo desta tese, focalizando-se na atmosfera como componente do sistema climático e no papel da composição química da atmosfera, em particular, neste sistema.

Para atingir o objectivo principal utilizaram-se os resultados de um modelo global em clima futuro na determinação da meteorologia e produção fotoquímica sobre Portugal, tendo sido aplicada, para o efeito, uma cascata de modelos. Os modelos usados e a metodologia que serve de base à desagregação de emissões para aplicação em modelos fotoquímicos são descritos no Capítulo 3.

No Capítulo 4 pretende-se mostrar, com base em registos históricos, quais as características das estações de qualidade do ar com maior número de anos de operação e quais as tendências nas concentrações dos poluentes gasosos analisados ao longo do tempo. Para tal aplicaram-se técnicas de estatística básica e filtragem de séries temporais. Estabelecem-se, ainda, relações entre a estabilidade vertical da atmosfera e as concentrações de poluentes em superfície, em que a abordagem seguida se pode considerar original.

O enriquecimento da troposfera média com ozono estratosférico é um acontecimento comum no Hemisfério Norte e pode dar origem a episódios de ozono medidos em superfície. Este fenómeno constitui um factor dinâmico a determinar as concentrações de ozono registadas em alguns casos e que convém ter presente quando se analisam os registos históricos de ozono. De forma a conhecer melhor o fenómeno e determinar qual a importância que poderá ter no balanço troposférico de ozono em cenário de clima futuro, no Capítulo 5 analisam-se alguns eventos em que as medições de ozono registadas em superfície são difíceis de atribuir à produção fotoquímica. Tratando-se de um processo essencialmente dinâmico, o estudo é feito recorrendo essencialmente a modelos meteorológicos, mas também a modelos fotoquímicos.

A avaliação da qualidade do ar em cenário climático no futuro requer um inventário de emissões para Portugal Continental para o horizonte temporal de 2050, e que no presente estudo se construiu com base em pressupostos energéticos. No Capítulo 6 apresentam-se os pressupostos impostos para a obtenção de um inventário de emissões, resultantes da

actividade antropogénica e biogénica, em 2050 e quais os impactes que estas têm na qualidade do ar em cenário de clima futuro, relativamente à situação de cenário de clima actual. A possível contribuição dos incêndios florestais na qualidade do ar é avaliada de forma indirecta, através da estimativa das distribuições dos valores risco meteorológico de incêndio relacionado com a área ardida, obtidos em cenário de clima actual e futuro.

Dada a preocupação relacionada com os efeitos nefastos que o ozono pode ter na saúde humana, na vegetação e na degradação dos materiais a ele expostos, pretende-se que este trabalho explore, de uma forma integrada e holística, a problemática do ozono na actualidade e quais os impactes que as variações futuras do clima e das emissões de precursores, resultantes das actividades socio-económicas e naturais possam vir a ter nas concentrações deste gás.

Capítulo 2

2 O sistema climático e as alterações no clima

O ar que respiramos é um recurso do qual dependemos, como espécie, para a nossa sobrevivência. A sua qualidade reflecte-se em muitos factores sendo determinada por vários fenómenos. Neste capítulo enquadrar-se-á a temática das alterações climáticas globais e os seus impactes na qualidade do ar, nomeadamente a importância do ozono e a sua interacção com o clima.

Tempo, clima e vida sobre a Terra estão intimamente relacionados, e são indissociáveis, formando parte de um sistema mais vasto que comporta cinco componentes, ou subsistemas, e as relações entre eles: a atmosfera, a hidrosfera, a superfície terrestre, a criosfera e a biosfera (ver Figura 2.1).

A Organização Meteorológica Mundial considera o tempo como o estado da atmosfera num dado instante, enquanto que o clima é uma medida do que se espera num dado mês, estação do ano ou ano, sendo determinada a partir de parâmetros estatísticos extraídos de séries de observações de variáveis meteorológicas (WMO, 2003). Desta forma, são a média, a variabilidade e os extremos dos consecutivos estados termo-hidrodinâmicos apresentados pela atmosfera que definem o clima (Peixoto e Oort, 1992). Este é modulado por factores internos e externos num determinado local. Os factores externos podem dividir-se em dois grupos:

- a) factores gerais, como a radiação solar, a esfericidade da Terra, o movimento da Terra em torno do Sol, a sua rotação, a existência de continentes e oceanos;
- b) factores regionais e locais, como a distância ao mar, topografia, tipo de superfície, coberto vegetal, e proximidade a lagos.

Entre os factores internos constam as propriedades intrínsecas da atmosfera, tais como a sua composição, vários tipos de instabilidade e a circulação geral.

2.1 Componentes do sistema climático

O sistema climático global assume-se ser fechado e não isolado. Não isolado porque recebe e emite energia, fechado porque não há permuta de matéria com o ambiente envolvente, ou seja, para o restante Universo (Peixoto, 1981). Contrariamente, todos os subsistemas são

abertos e não isolados, pois é constante o fluxo de massa, de quantidade de movimento e de energia através das suas fronteiras. Os componentes do sistema climático são subsistemas termo-hidrodinâmicos heterogêneos, caracterizados pela sua composição química e os seus estados mecânicos e termodinâmicos. Tanto os estados termodinâmicos como os estados mecânicos são descritos por variáveis intensivas. Os primeiros através da temperatura, pressão, humidade específica, energia específica, massa volumica e salinidade e os segundos por variáveis que caracterizam o movimento, como sejam a força e a velocidade.

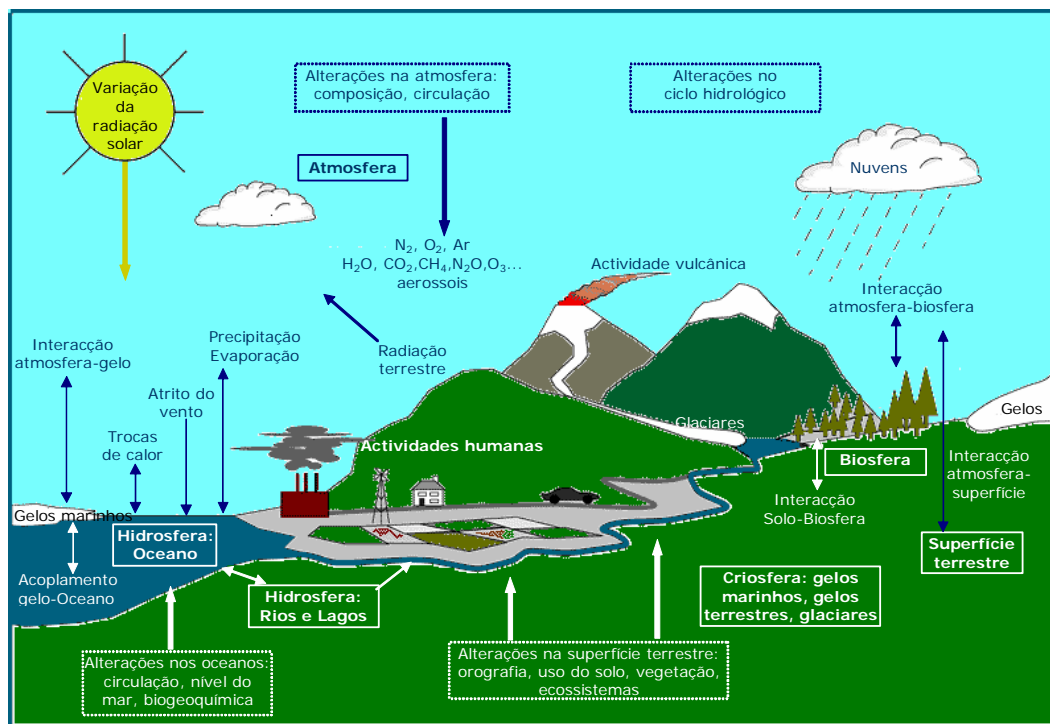


Figura 2.1: Sistema climático (adaptado de IPCC, 2001).

A escala temporal estimada para as diferentes componentes do sistema climático é variável. Esta escala é proporcional ao tempo de resposta de cada componente a um determinado agente forçador (Figura 2.2). Por exemplo, a escala temporal da camada limite atmosférica varia de alguns minutos a algumas horas enquanto os movimentos das águas oceânicas profundas têm escalas temporais entre a década e o milénio.

É conveniente considerar uma hierarquia de sistemas em que os que apresentam escalas temporais mais curtas sejam considerados como o sistema climático interno e os restantes, de resposta mais lenta, os sistemas externos. Por exemplo, para escalas temporais de horas a semanas a atmosfera pode ser considerada como única componente do sistema climático. Todavia, se as escalas temporais em análise forem da ordem dos meses a anos, os oceanos e atmosfera deverão estar ambos incluídos no sistema climático interno. Assim, apesar de atmosfera ser a componente principal do sistema climático não pode ser considerada como um sistema à parte dos restantes sistemas termodinâmicos.

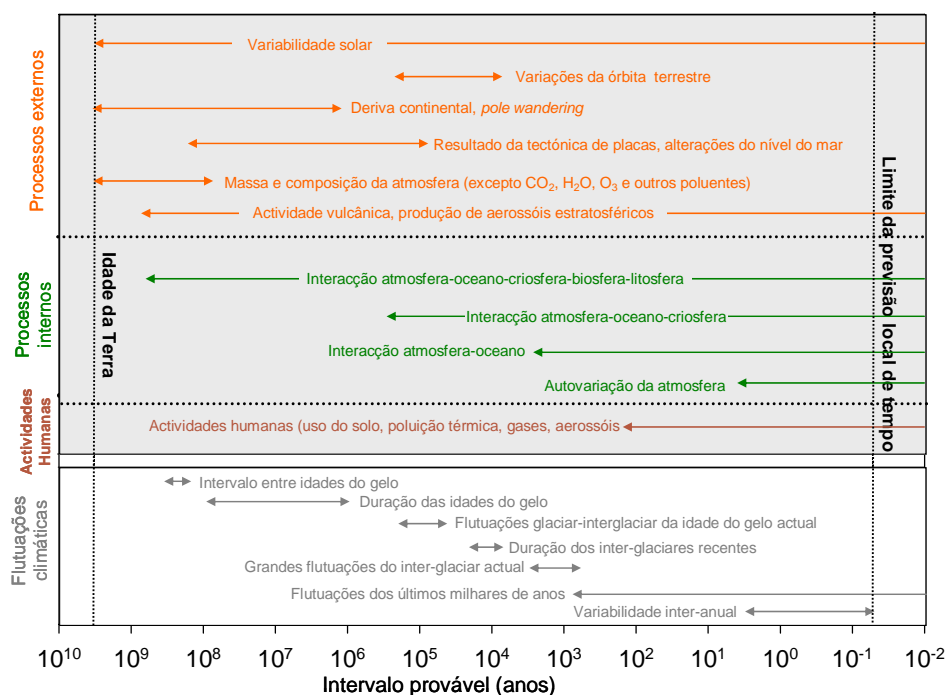


Figura 2.2: Escalas temporais características das componentes do sistema climático e alguns factores externos forçadores do sistema (adaptado de Peixoto e Oort, 1992).

O sistema climático é regulado por três leis fundamentais: a lei da gravitação, a primeira e segunda leis da termodinâmica. A diferenciação da massa volúmica da atmosfera consiste num exemplo de aplicação da lei da gravitação. A primeira lei da termodinâmica, ou Lei da Conservação da Energia, diz que em qualquer processo, a energia total do sistema, sob as várias formas possíveis, e a do seu ambiente, permanece constante. É uma lei fundamental no cálculo de balanços energéticos permitindo obter valores de componentes do sistema impossíveis de serem medidas. A Segunda Lei da Termodinâmica, também denominada a Lei Suprema da Natureza, introduz o conceito de entropia como a função de estado que varia quando ocorrem alterações no volume (pressão) e na temperatura. É a segunda lei que dita a possibilidade de ocorrência de determinados processos dentro de um sistema (Tsonis, 2002), que faculta a determinação da relação entre as diferentes formas de energia e que descreve a direcção do fluxo de energia dentro dos sistemas (McIlveen, 1998). Contudo, estas duas leis estão relacionadas, tal como faz notar Peixoto (1981):

“Na grande fábrica dos processos naturais - que é a própria Natureza – o princípio do aumento da entropia é o princípio da gestão, de decisão e das grandes opções, enquanto que o princípio da conservação da energia desempenha o papel do contabilista, preocupado apenas com o balanço do «deve» e «haver».”

O subsistema termo-hidrodinâmico atmosfera pode, por sua vez, ser comparado com uma máquina térmica de Carnot. Tal como uma máquina feita pelo Homem, a atmosfera retira calor de uma fonte e fornece-o, por sua vez, a um sumidouro de calor, produzindo energia mecânica. A fonte de calor está associada à absorção de energia solar, sobretudo pela superfície terrestre, enquanto que o sumidouro de calor constitui a emissão para o espaço

de radiação infravermelha. A energia solar é responsável por praticamente toda a actividade presente na atmosfera e a causa de todos os efeitos nela observados pois a energia radiante do Sol influencia a atmosfera mas não é influenciado por esta (McIlveen, 1998). A entropia da energia solar que entra na atmosfera é 20 a 30 vezes menor que a entropia reemitida para o espaço devido à diferença de temperatura do corpo emissor, a superfície terrestre. Uma vez que a Terra se encontra em equilíbrio radiativo no topo da troposfera, a génese da entropia encontra-se em processos irreversíveis como o atrito e a difusão, fazendo com que o sistema climático seja um sistema com alto poder de dissipação (Peixoto, 1981).

McIlveen (1998) descreve o funcionamento da máquina térmica atmosférica do seguinte modo (ver Figura 2.3): fazendo uso do calor superficial Q_1 a troposfera gera energia mecânica M através de uma vasta gama de mecanismos, entre eles: a circulação de Hadley, as monções, os sistemas depressionários e anticiclónicos, e a convecção por cúmulos. Contudo, cada “pacote” de M que se forma permanece um tempo determinado na atmosfera acabando por se transformar novamente em calor, por atrito. Parte da energia transformada pelo atrito, energia interna, soma-se ao fluxo de calor Q_2 , que contém os fluxos de calor advectivo e convectivo, antes de ser enviado para o espaço em forma de radiação de baixo comprimento de onda. A restante energia interna adiciona-se à radiação terrestre a menores altitudes. A emissão de calor no topo da troposfera admite-se ser feita à temperatura T_2 ($T_2 < T_1$), sensivelmente a temperatura da camada opaca à radiação mais elevada na atmosfera.

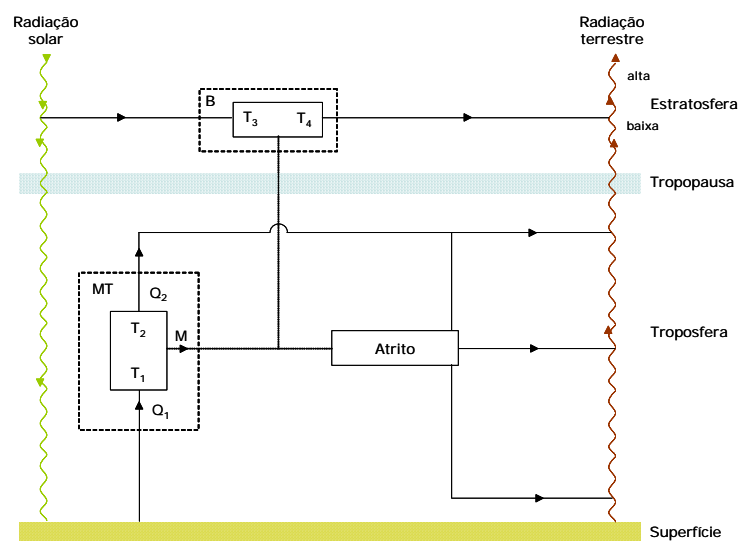


Figura 2.3: Esquema da máquina térmica atmosférica (MT) e da bomba estratosférica (B) Linhas a ~: fluxos de energia radiante; —: fluxos de calor;---: fluxos de energia mecânica (adaptado de McIlveen, 1998).

Os oceanos ajudam a atmosfera na advecção de calor e na suavização das variações sazonais e latitudinais da temperatura T_1 à qual se dá o fluxo de calor de entrada na troposfera. Por outro lado, a baixa estratosfera actua como uma bomba de calor, forçando o fluxo de calor das zonas equatoriais, elevadas e frias (à temperatura T_3) para as zonas polares (mais quentes e a menores altitudes, à temperatura T_4). O mecanismo responsável

parece envolver turbilhões de escala sinóptica produzidos à custa de energia mecânica de ondas troposféricas de grande comprimento de onda.

Contudo, existem algumas diferenças entre a máquina térmica atmosfera e uma máquina de Carnot construída pelo Homem. A atmosfera gera e mantém constantemente a sua estrutura, que inclui uma hierarquia de perturbações associadas com o tempo que se faz sentir à superfície, tal não se verificando numa máquina feita pelo Homem; por outro lado, é totalmente fluida, e opera dentro de uma grande gama de valores espaciais e temporais e a sua actividade apresenta grandes valores de intensidade.

A máquina térmica atmosférica controla a entrada de energia solar no sistema através da produção de nuvens, as quais reflectem uma porção significativa de luz solar para o espaço e regulam simultaneamente a saída de radiação terrestre. O movimento e a distribuição instável da massa atmosférica reflecte, portanto, a energia mecânica produzida (McIlveen, 1998).

A interacção entre a radiação terrestre, solar, a superfície da Terra e a atmosfera podem apresentar localmente balanços energéticos imperfeitos entre a superfície e a troposfera, e entre as altas e baixas latitudes (McIlveen, 1998). O movimento e a distribuição instável da massa atmosférica resultam da anulação, em termos globais, destes balanços e o estabelecimento do equilíbrio térmico no qual se encontra, em média, o sistema Terra-Atmosfera. Neste balanço, e devido a factores astronómicos, as latitudes baixas sofrem um aquecimento radiativo enquanto que as latitudes médias e altas arrefecem de forma radiativa. Para que o equilíbrio térmico seja preservado este aquecimento e arrefecimento deverão ser compensados pela transferência de calor do equador para as regiões extratropicais e por convecção destes mesmos fluxos entre a superfície e a troposfera. Os oceanos têm um papel importante, cooperando com a atmosfera na advecção de calor e na suavização das variações sazonais e latitudinais da temperatura T_1 à qual se dá o fluxo de calor de entrada na troposfera (Salby, 1996 e McIlveen, 1998).

Particularizando, a energia presente na atmosfera, desde a sua absorção até à possível re-emissão para o espaço, sofre várias transformações, sobretudo em três tipos de reservatórios distintos (Salby, 1996):

- Energia térmica: representada pela temperatura e pelo teor de humidade presente no ar, e para a qual contribuem os calores sensível e latente. Este tipo de energia reflecte-se na energia interna do ar seco;
- Energia gravitacional potencial: materializada pela distribuição horizontal das massas de ar;
- Energia cinética: contida no movimento das massas de ar.

As transformações de energia térmica e potencial em energia cinética são as responsáveis por manter a atmosfera em movimento e a circulação contrariamente ao fenómeno da dissipação da energia por atrito.

A aproximação de equilíbrio hidrostático implica que a variação da pressão numa superfície isentrópica traduza a distribuição de massa não uniforme sobre a superfície do

globo. O gradiente de pressão que se estabelece induz o movimento das massas de ar, movimento este que está sujeito à força de Coriolis, tornando-o rotacional (Figura 2.4). Esta rotação induz a homogeneização da atmosfera através da grande mistura das massas de ar horizontais através de ciclones. Em condições barotrópicas não se verificam as variações de pressão. Como consequência da hipótese de equilíbrio hidrostático, a energia potencial gravitacional e a energia térmica mantêm uma razão constante, seja qual for a sua variação. A soma dos seus termos resulta na variável energia potencial total. Em condições adiabáticas a energia cinética só pode resultar da variação da energia potencial total.

Contudo, apenas uma pequena parte da energia potencial está disponível para se transformar em energia cinética. Em sistemas com estratificação barotrópica a energia potencial existente não está disponível para transformação em energia cinética pois não há variação da pressão ao longo das superfícies isentrópicas, e portanto, não há gradiente de pressão. O mesmo não se passa numa atmosfera com estratificação baroclínica, à qual se pode aproximar a atmosfera dos hemisférios terrestres em equilíbrio radiativo global (Figura 2.5). A inclinação das superfícies isobáricas e isentrópicas, relativamente às suas posições em estratificação barotrópica, simboliza o aquecimento da atmosfera às baixas latitudes e aquecimento às latitudes elevadas.

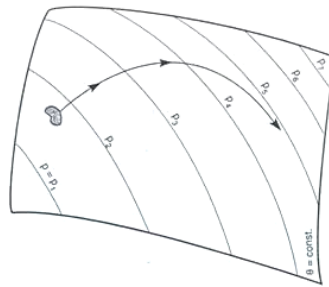


Figura 2.4: Variação da pressão em superfície isentrópica em condições baroclínicas (Salby, 1996).

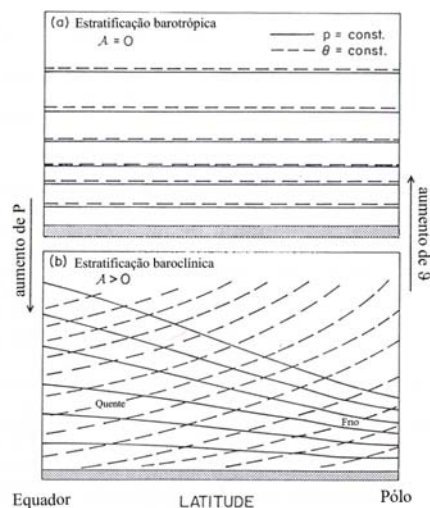


Figura 2.5: Estrutura térmica correspondente a: a) estratificação barotrópica, em que as superfícies isentrópicas e as superfícies isobáricas são coincidentes e a energia potencial disponível é nula; e b) estratificação baroclínica, onde as superfícies isentrópicas e isobáricas não são coincidentes e a energia potencial disponível é positiva (Salby, 1996).

É com base na visão da atmosfera como uma máquina térmica que Sir Napier Show (McIlveen, 1998) define o estado do tempo como sendo o “resultado de um motor natural vasto”.

2.2 Composição química da atmosfera e o efeito de estufa

Tal como referido anteriormente, os subsistemas climáticos são também caracterizados pela sua composição química. No caso da atmosfera a sua composição influencia o seu estado termodinâmico pois é responsável por elevar a sua temperatura de equilíbrio radiativo, permitindo a complexidade de subsistemas do sistema climático, e que regula as transferências das diferentes formas de energia permitindo a vida, tal como se conhece.

A atmosfera natural é constituída por gases que não possuem propriedades de corpo negro e, como tal, absorve e emite radiação em gamas de comprimentos de onda específicos. De entre os gases atmosféricos absorvedores selectivos fazem parte o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4), o ozono (O_3), sendo os mais importantes o dióxido de carbono (CO_2) e o vapor de água (H_2O). Estes dois últimos absorvem e emitem fortemente a radiação infravermelha, sendo transparentes à radiação ultravioleta e visível. Desta forma, actuam como uma camada isoladora à radiação infravermelha, evitando que esta se escape de forma imediata para espaço (Ahrens, 2003). A este fenómeno designa-se vulgarmente por efeito de estufa atmosférico, e os gases por ele responsáveis denominam-se gases de efeito de estufa, GEE (Figura 2.6).

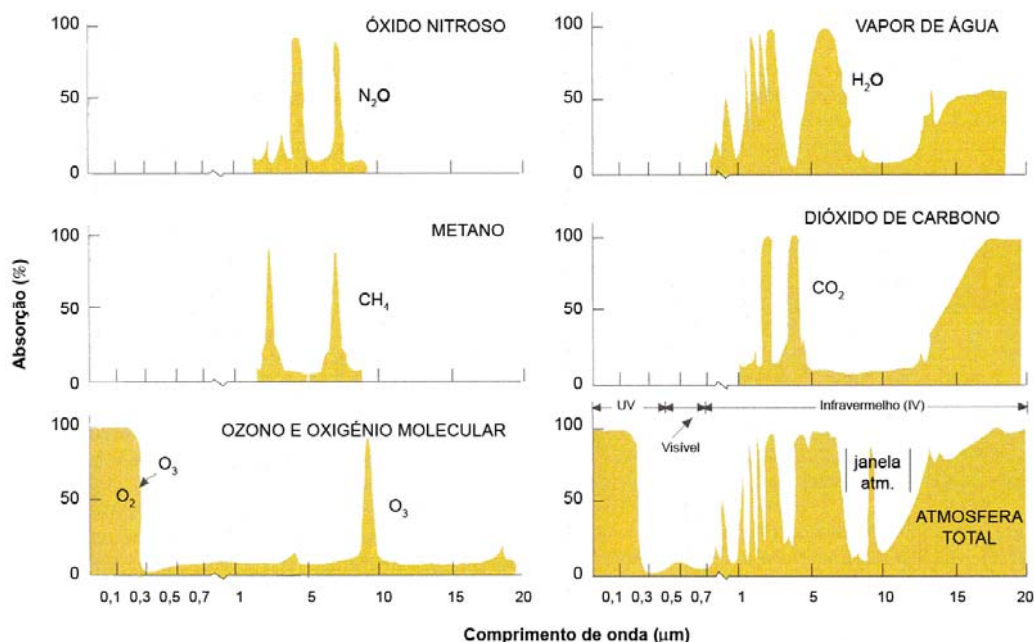


Figura 2.6: Absorção de energia por gases de efeito de estufa e pela atmosfera (Ahrens, 2003).

Os gases acima nomeados perfazem, juntamente com outros vestigiais, cerca de 1 % do volume total, os restantes 99 % distribuem-se entre o azoto molecular (78 % em volume) e oxigénio molecular (21 %). Apesar de estarem presentes em pequenas quantidades têm um papel importante no balanço radiativo da atmosfera, como se terá oportunidade de apreciar.

Os gases presentes na atmosfera natural distribuem-se homoganeamente ou de forma diferenciada, se forem gerados e consumidos em regiões particulares da atmosfera, e por esse motivo estarem relacionados com a circulação atmosférica através do transporte. Na Tabela 2.1 descrevem-se os constituintes da atmosfera, presentes em maiores concentrações, através da sua razão de mistura representativa da troposfera ou estratosfera, a sua distribuição vertical e quais os principais processos que controlam a sua repartição.

Tabela 2.1: Composição da atmosfera (Salby, 1996)

Constituinte	Razão de mistura troposférica	Distribuição Vertical (razão de mistura)	Processos de controlo
N ₂	0,78	Homogénea	Mistura vertical
O ₂	0,2095	Homogénea	Mistura vertical
H ₂ O ^b	≤ 0,030	Decresce na troposfera suavemente; aumenta na estratosfera; altamente variável.	Evaporação, condensação; produção por oxidação do CH ₄
Ar	0,0093	Homogénea	Mistura vertical
CO ₂ ^a	345 ppmv	Homogénea	Mistura vertical; produção por processos superficiais e antropogénicos.
O ₃ ^a	10 ppmv ^b	Aumenta ligeiramente na estratosfera; altamente variável.	Produção fotoquímica na estratosfera; destruição por transporte superficial
CH ₄ ^a	1,6 ppmv	Homogéneo na troposfera; decresce na atmosfera média.	Produção por processos superficiais; a sua oxidação produz H ₂ O
N ₂ O ^a	350 ppbv	Homogéneo na troposfera; decresce na atmosfera média.	Produção por processos superficiais e antropogénicos; dissociação na atmosfera média; Produz transporte de NO
CO ^b	70 ppbv	Diminui na troposfera e aumenta na estratosfera	Produção antropogénica e por oxidação de CH ₄ ; transporte.
NO	0,1 ppbv ^b	Aumenta verticalmente	Produção pela dissociação de NO ₂ através da dissociação catalítica de O ₃
CFC-11 ^a	0,2 ppbv	Homogéneo na troposfera; diminui na estratosfera	Produção industrial; mistura na troposfera; fotodissociação na estratosfera.
CFC-12 ^a	0,3 ppbv	Homogéneo na troposfera; diminui na estratosfera.	Produção industrial; mistura na troposfera; fotodissociação na estratosfera.

a) radiativamente activos

b) valor estratosférico

É, assim, natural perguntar como é que o sistema Terra-Atmosfera consegue manter a sua temperatura média de equilíbrio aproximadamente constante, em termos médios anuais, apesar de a temperatura média de um determinado local poder variar ao longo do ano.

O balanço radiativo da atmosfera mostra que 30 % da energia que atinge o sistema Terra-Atmosfera é reflectida para o espaço, 19 % é absorvida pela própria atmosfera e 51 % é absorvida pela superfície da Terra. A Figura 2.7 detalha os termos, e valores associados, do balanço energético neste sistema. Ao analisar o balanço energético pode ter-se uma noção da importância da condução, convecção e do calor latente no aquecimento da atmosfera. De facto, a superfície da terra recebe 147 unidades de energia radiante fornecida pelo Sol e pela atmosfera, enquanto que apenas irradia 117 unidades, o que leva a um superavit de 30 unidades. Por seu lado, a atmosfera recebe 130 unidades (19 directamente do Sol e 111 da superfície terrestre), e perde 160 unidades, o que contabiliza um défice de 30 unidades. Este resultado representa o aquecimento da atmosfera através de processos de condução e convecção e pela libertação de calor latente.

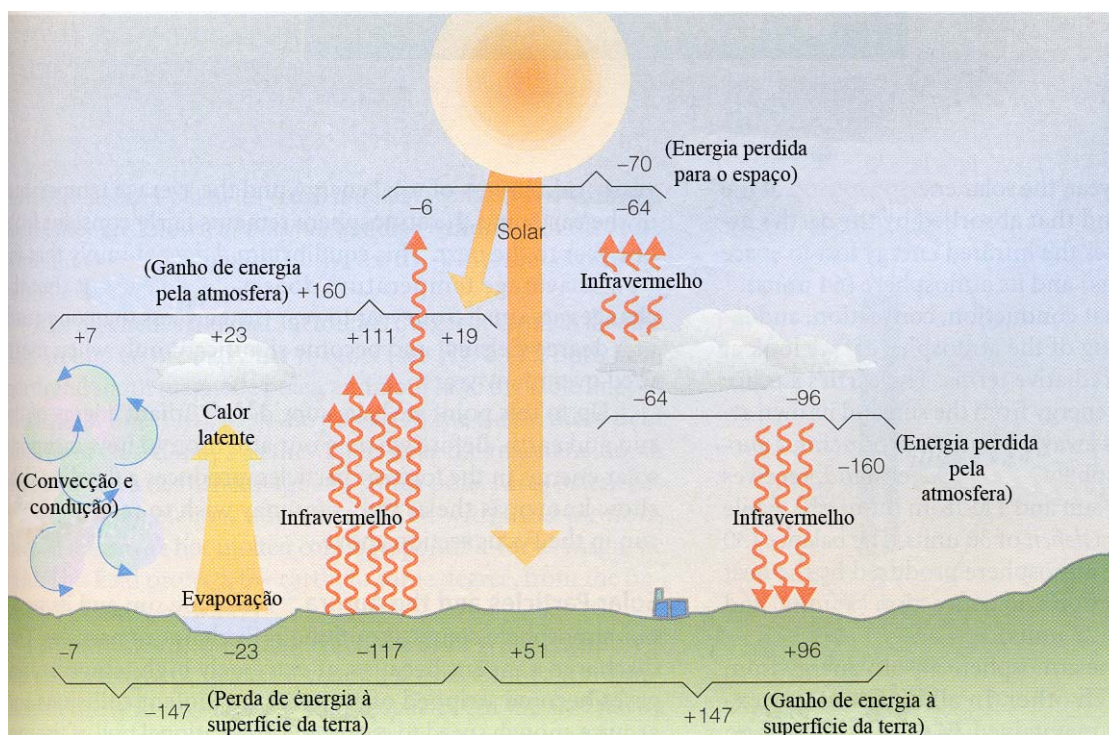


Figura 2.7: Balanço energético Terra-Atmosfera (Ahrens, 2003).

A Terra e a atmosfera recebem energia do Sol, mas também uma da outra, mantendo-se em equilíbrio e, como sistema, enviam para o espaço a mesma quantidade de radiação que recebem do Sol. Apenas o fazem com um comprimento de onda mais baixo, reflectindo o aumento da entropia e, portanto, a diminuição da qualidade da energia na passagem pelo sistema (Peixoto, 1981).

Como se mostrou anteriormente, a atmosfera tem um papel central no sistema climático porque para além de servir como mediador do fluxo energético entre o Sol e a superfície do

planeta tem também um papel importante nos fluxos de energia e matéria entre os componentes do sistema Terra (ver Figura 2.8). Os compostos químicos presentes na atmosfera, neles incluídos os gases mais abundantes, são usados e regenerados por processos biológicos de forma constante.

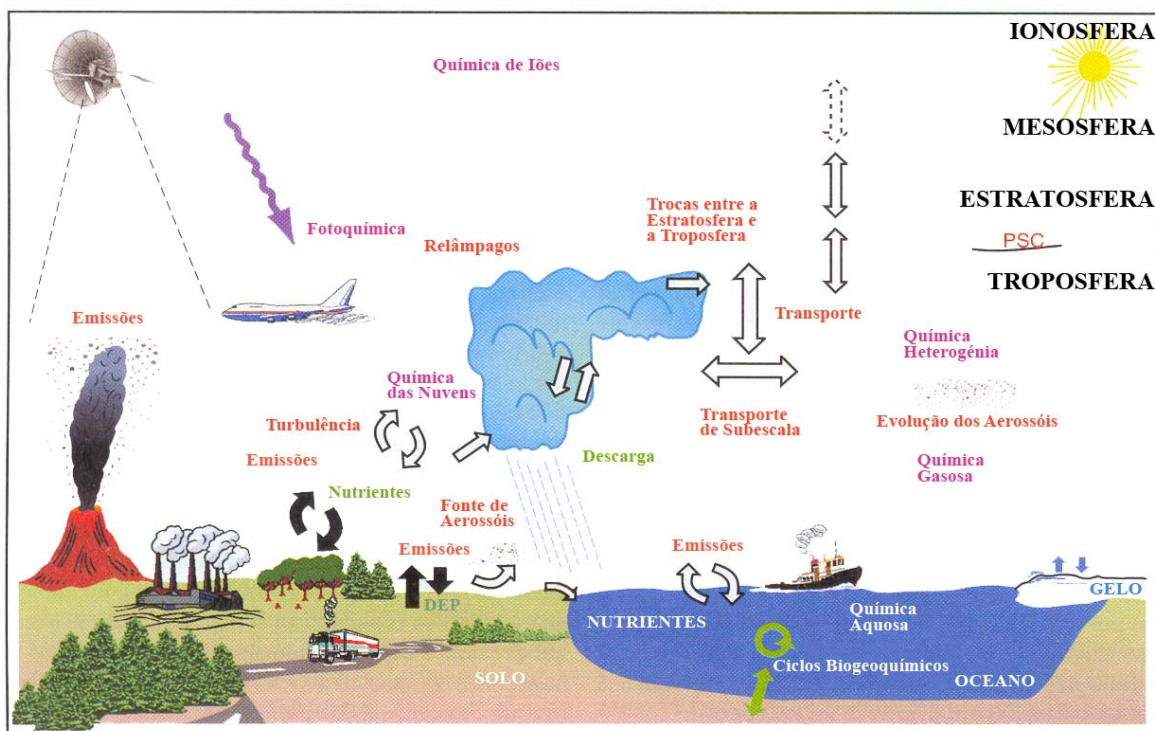


Figura 2.8: Processos essenciais que afectam a formação e o destino de compostos químicos na troposfera (Brasseur *et al.*, 2003).

A Figura 2.8 esquematiza os processos físicos e químicos pelos quais as concentrações de gases e partículas atmosféricas se vêm alteradas, nomeadamente pelas emissões naturais e antropogénicas, transporte de grande escala, transporte de micro-escala, reacções fotoquímicas, de fase gasosa e de fase gasosa-aquosa, conversão química heterogénea, trocas entre a estratosfera e a troposfera, deposição seca e húmida (Brasseur *et al.*, 2003).

Os compostos químicos gasosos reduzidos são emitidos para a atmosfera pelos ecossistemas terrestres e oceânicos, e pela actividades antropogénicas. Grande parte do seu destino reside na sua oxidação, cujos produtos são removidos pela deposição na superfície terrestre. A subsequente assimilação e redução na biosfera fecha o ciclo atmosfera-biosfera. A distribuição global dos compostos químicos na atmosfera depende então de processos químicos, físicos e biológicos. Todavia, é o transporte que determina quais as regiões que serão fontes e quais serão sumidouros de uma determinada substância, pois é este que impulsiona a interacção dos diferentes compostos químicos, provenientes de diferentes fontes, e que, através dos movimentos atmosféricos, promove a advecção das propriedades químicas e físicas da atmosfera entre diferentes posições geográficas.

As escalas dos movimentos atmosféricos em conjugação com o tipo de espécies químicas emitidas, e presentes na atmosfera, e o seu tempo de vida, determinam a sua constituição ao nível global e regional. A maior parte dos compostos gasosos é emitida na camada limite planetária, onde a intensidade do vento é fraca, em geral, mas onde a turbulência é grande. Esta camada apresenta um ciclo dinâmico diário, sendo caracterizada por teores de humidade elevados e grandes concentrações de compostos emitidos em superfície. Na presença de convecção, os compostos químicos podem ser transportados da camada limite atmosférica para a troposfera livre. Estes processos juntamente com os sistemas frontais constituem importantes mecanismos de mistura vertical na troposfera livre. O ar transportado verticalmente arrefece e o vapor de água nele presente condensa, podendo ocorrer precipitação, removendo gases e partículas, constituindo desta forma um processo de remoção destes constituintes atmosféricos. Por outro lado, a troca de massa através da tropopausa também afecta de forma significativa a distribuição de compostos presentes na troposfera, de que é exemplo o ozono.

Em termos horizontais é a advecção de grande escala a responsável pelo transporte intercontinental de espécies químicas com elevado tempo de residência, de alguns meses ou mais. Estes compostos tendem a estar quasi-uniformemente misturados na atmosfera devido à existência dos padrões de tempo e à actividade convectiva.

Não são apenas os processos dinâmicos os únicos agentes na distribuição de compostos na atmosfera, as transformações químicas na fase gasosa ou em processos multifásicos têm também um papel muito importante na concentração de alguns compostos atmosféricos, estando as suas velocidades de reacção e os tempos de residência dos seus constituintes controlados por múltiplos factores, tanto químicos como físicos. Como exemplo tem-se a dependência das velocidades de fotólise pelo fluxo actínico solar que penetra na atmosfera, e como tal, de processos de absorção e dispersão por moléculas, nuvens e partículas de aerossol. A regulação do tempo de residência de compostos químicos na atmosfera é feita através das velocidades dos processos responsáveis pela sua remoção, sejam eles o consumo químico ou a deposição seca ou húmida. Os compostos quimicamente estáveis e insolúveis em água podem permanecer durante anos ou décadas na atmosfera, estando sujeitos a transportes para a atmosfera média e a influenciar os mecanismos químicos de outras camadas.

A Figura 2.9 pretende sintetizar os processos químicos que ocorrem na troposfera e as principais fontes emissoras de alguns constituintes gasosos. As actividades humanas e biológicas emitem no seu conjunto CH_4 , NO_2 , CO_2 , SO_2 (dióxido de enxofre), CO (monóxido de carbono), NO (óxido de azoto), CFCs (clorofluorcarbonetos) e N_2O . Os dois últimos compostos têm um tempo de residência apreciável na troposfera, dado que não são consumidos em qualquer reacção química. Os restantes compostos, juntamente com as espécies de enxofre emitidas naturalmente e o vapor de água presente na atmosfera, são incorporados num mecanismo de oxidação. Como se pode observar na Figura 2.9, o radical hidróxilo (OH^\bullet), pelo facto de ser o principal agente oxidante presente na atmosfera, determina muitos dos tempos de residência de grande parte dos compostos gasosos. Como o OH^\bullet é um fragmento da molécula de água, molécula esta bastante estável, para se regenerar novamente H_2O necessita conseguir rapidamente um átomo de hidrogénio de

qualquer outra molécula que o possua tornando-o uma espécie química extremamente reactiva. Contudo o radical OH^\bullet não é o único oxidante presente na troposfera. As reacções de oxidação possíveis incluem o O_3 ; o peróxido de hidrogénio (H_2O_2), na conversão de dióxido de enxofre em ácido sulfúrico; o radical livre NO_3^\bullet (trióxido de azoto), na química nocturna de áreas poluídas; e as espécies halogenadas.

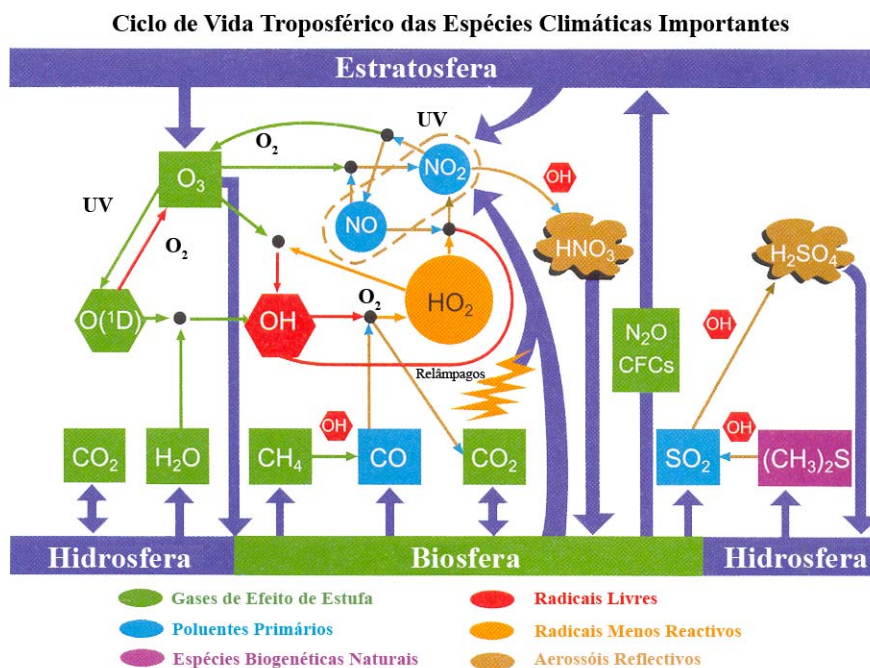


Figura 2.9: Esquema dos principais mecanismos químicos presentes na atmosfera (Brasseur *et al.*, 2003).

Como se observou na Tabela 2.1, o CH_4 , o CO_2 , o N_2O e os compostos halocarbonados, pelo seu tempo de residência na atmosfera, são gases atmosféricos bem misturados e que, pela sua importante propriedade de selectividade de absorção em gamas de comprimentos de onda na banda dos infravermelhos, têm o potencial de alterar o balanço radiativo atmosférico em termos globais e, portanto, a temperatura de equilíbrio radiativo do sistema Terra-atmosfera. Este facto confirma-se através da correlação entre temperatura e as concentrações de metano e dióxido de carbono, inferidas a partir da análise de bolhas de ar presentes nos gelos antárcticos dos últimos 420 000 anos (Figura 2.10). As flutuações de temperatura são também significativamente correlacionáveis com alguns tipos de aerossóis. Ambas as correlações indicam a influência dos ciclos glaciares, fornecendo desta forma uma indicação do acoplamento entre os constituintes atmosféricos vestigiais homsféricos e os processos físicos climáticos através dos ciclos bio-geo-químicos (Brasseur *et al.*, 2003).

Desde a revolução industrial, as concentrações de alguns destes gases têm vindo a aumentar, atingindo os valores mais elevados dos últimos 400 000 anos. No que respeita ao CO_2 , a sua concentração manteve-se em níveis de 280 ± 10 ppm durante períodos milenares antes de se ver alterada, para valores superiores entre 10-30% actualmente, pelas emissões industriais e pelas que resultam de alterações de uso do solo (IPCC, 2001). No

mesmo período, as concentrações de metano aumentaram em cerca de 150 % apresentando um valor actual de 1060 ppb, para o qual as emissões antropogénicas contribuem em mais de 50 %. Os níveis de N_2O aumentaram para 46 ppb, cerca de 16 % em relação à mesma janela temporal. Os CFCs e hidrofluorcarbonetos (HCFCs) não existem naturalmente e a sua presença apenas se fez sentir após a era industrial. Na Tabela 2.2 encontram-se as concentrações de alguns gases de efeito de estufa que estão sujeitos a flutuações na sua concentração devido às emissões por actividades antropogénicas.

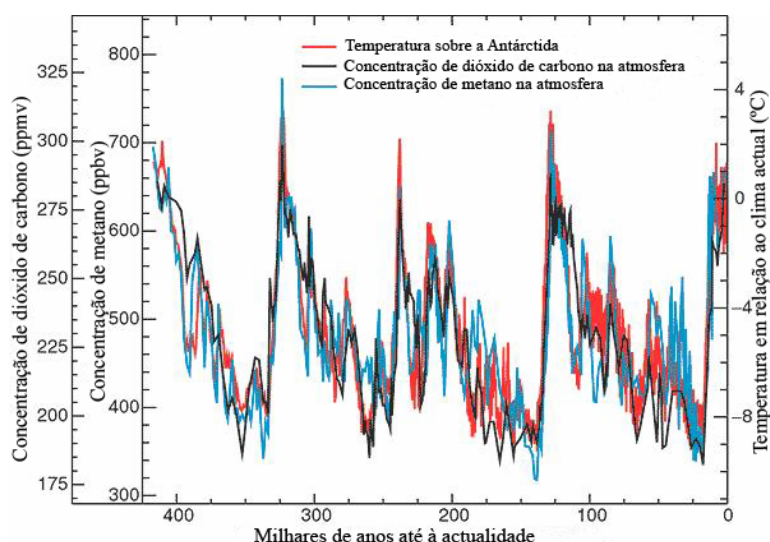


Figura 2.10: Variação da temperatura, concentração de metano e de dióxido de carbono na atmosfera inferidos a partir de ar contido em gelo da Antártida (IPCC, 2001).

Tabela 2.2: Evolução da concentração e tempo de residência de gases de efeito de estufa na atmosfera (IPCC, 2001).

	CO_2	CH_4	N_2O	CFC-11	HFC-23	CF_4
Concentração pré-industrial	~280 ppm	~700 ppb	~ 270 ppb	0	0	40 ppt
Concentração em 1998	365 ppm	1745 ppb	314 ppb	268 ppt	14 ppt	80 ppt
Variação de concentração ^b	1,5 ppm.ano ^{-1a}	7,0 ppb.ano ^{-1a}	0,8 ppb.ano ⁻¹	-1,4 ppt.ano ⁻¹	0,55 ppt.ano ⁻¹	1,0 ppt.ano ⁻¹
Tempo de residência (vida) atmosférico	5-200 anos ^c	12 anos ^d	114 anos ^d	45 anos	260 anos	> 50000 anos

^a no período entre 1990 e 1999, esta velocidade tem sofrido flutuações entre 0,9 ppm.ano⁻¹ para o CO_2 e entre 0 e 13 ppb.ano⁻¹ para o CH_4 .

^b Taxa calculada para valores no período entre 1990 e 1999.

^c não se pode atribuir ao CO_2 um tempo de vida único devido aos valores díspares apresentados pelos processos de remoção

^d este tempo de residência tem sido definido como um tempo de ajuste que considera o efeito indirecto do gás no seu próprio tempo de vida.

2.3 *O ozono como gás de efeito de estufa e a sua interacção com o clima*

Para além dos gases de efeito de estufa homossféricos, a atmosfera tem na sua constituição espécies químicas cujas concentrações são reguladas preferencialmente à escala regional e cujo efeito no balanço radiativo pode ser directo ou indirecto, como por exemplo, os aerossóis e o ozono.

O ozono não é emitido para a atmosfera de forma directa, é um composto secundário cuja concentração troposférica é afectada pelas emissões dos gases seu precursores, nomeadamente os óxidos de azoto (NO_x), o CO, os compostos orgânicos voláteis (COV) e o CH_4 . Por outro lado, na estratosfera são as substâncias que removem o ozono aí presente, como por exemplo, os CFC, o N_2O , os compostos de brometo, o NO_x e o CH_4 , que determinam a sua concentração. Os níveis de ozono estão intimamente relacionados como poder oxidante da troposfera (Figura 2.9) e afectam, indirectamente, os gases de efeito de estufa quimicamente activos, como é o caso do CH_4 e HCFC (UE, 2003). O facto de o ozono ser um gás quimicamente activo, com um tempo de vida na troposfera relativamente curto, e que depende da distribuição de gases fonte (na troposfera) e de gases que o consomem (na estratosfera), induz uma variação temporal e espacial forte no forçamento radiativo devido a variações na sua concentração e torna a sua interacção com o clima muito complexa e difícil de analisar.

Tal como se observou para as concentrações de gases bem misturados na atmosfera, as variações da concentração de ozono e dos seus precursores (NO_x , CO e COV) têm sido importantes desde o Século XVIII. Contudo, as estimativas feitas em relação a estes gases e a sua interacção com o clima baseiam-se sobretudo em resultados de modelos globais devido à falta de dados observados em termos históricos, e por isso mesmo têm um carácter especulativo.

Todavia, há muitas medições que permitem caracterizar algumas tendências. Muitos estudos mostram que o ozono troposférico aumentou entre 7-12 DU (*Dobson Unit*, em inglês) desde a era pré-industrial, sobretudo no Hemisfério Norte e que as concentrações de fundo de ozono duplicaram e triplicaram na Europa, desde os finais do Século XIX (UE, 2003). Observações mostram também diferenças regionais no aumento das concentrações, os Estados Unidos apresentam menores aumentos do que a Europa ou o Japão (Brasseur 2003 e UE, 2003). Por outro lado, na segunda metade do Século XX as concentrações de ozono parecem ter duplicado às latitudes médias do Hemisfério Norte. Contudo, não se têm verificado alterações significativas na concentração de ozono troposférico nas baixas latitudes, mas têm vindo a decrescer na troposfera livre das altas latitudes desde o início dos anos 1980, o que se poderá explicar pela diminuição de ozono na estratosfera (UE, 2003).

Para averiguar o possível impacte das alterações climáticas globais na qualidade do ar, nomeadamente a relacionada com o ozono troposférico em Portugal, é necessário conhecer a sua evolução ao longo do tempo. Uma parte do trabalho desenvolvido nesta dissertação ir-se-á focalizar na evolução temporal das concentrações de ozono, e seus precursores, e quais os fenómenos temporais que mais contribuem na sua variabilidade (Capítulo 4). Dada a importância que as condições meteorológicas têm na dispersão de poluentes ao nível do

solo, as séries temporais em análise foram também correlacionadas com parâmetros representativos da estrutura vertical da atmosfera. Correlações mais significativas no Inverno, em relação às concentrações de ozono, juntamente com indicações prévias obtidas em trabalhos anteriores (Barros, 1999), conduziram a um estudo mais detalhado das condições dinâmicas que levam à intrusão de ozono estratosférico junto à superfície (Capítulo 5).

Embora as variações das concentrações de ozono à escala global induzam alterações no clima, foi dada mais importância, no trabalho desenvolvido, ao mecanismo contrário, ou seja, ao impacto das alterações climáticas no ozono troposférico, pois é ao nível regional que se vai avaliar o impacto de cenários climáticos na qualidade do ar.

Os efeitos das alterações climáticas sobre o balanço do ozono global poderão afectar processos que se podem agrupar segundo a classificação emissão/remoção, produção/destruição química e transporte:

- nas emissões de precursores biogénicos e antropogénicos de ozono e na remoção destes gases;
- na alteração da química troposférica, pela alteração da capacidade oxidante da atmosfera e pela taxa de produção/remoção de ozono;
- no transporte de ozono.

Pelas razões anteriormente apontadas, os estudos do possível impacto das alterações climáticas sobre o balanço do ozono evidenciados no relatório técnico da Comissão Europeia (UE, 2003) e em Brasseur *et al.* (2003) consideram-se especulativos. Apesar deste facto, os modelos globais químicos constituem um meio imperioso na quantificação dos possíveis impactos e a eles se tem recorrido para esse fim. Os resultados obtidos a partir de estudos realizados nesta área estão resumidos na Tabela 2.3. Nesta, pode observar-se o provável impacto das alterações climáticas em alguns processos quantificados por modelos globais. Embora o IPCC (2001) classifique o nível de conhecimento científico baixo a muito baixo, neste domínio da ciência atmosférica, os possíveis efeitos estão avaliados em pequeno ($< 1\%$), médio ($1-5\%$) ou grande ($> 5\%$).

Os impactos das alterações climáticas far-se-ão sentir não somente na distribuição das concentrações do ozono na atmosfera, mas também influenciarão toda a atmosfera através de alterações na química, dinâmica, radiação e emissões superficiais. Desta forma, prevê-se que a troposfera superior e a baixa estratosfera sejam especialmente sensíveis às alterações climáticas, contudo, não é claro como responderão e quais serão as consequências globais das suas respostas.

Como se referiu, as emissões de precursores de ozono, e de outros gases indirectamente relacionados com a fotoquímica troposférica, constituem um dos factores que modelam a distribuição de gases de efeito de estufa resultantes das actividades antropogénicas e biogénicas. A importância relativa da fonte varia consoante o constituinte atmosférico. No caso do CH_4 , CO , compostos de enxofre e de NO_x , a importância das fontes antropogénicas é superior à das biogénicas. Por outro lado, as fontes biogénicas são as responsáveis pela maior parte das emissões de CO_2 e de N_2O .

Tabela 2.3: Impacte de alterações em processos relacionados com o clima nos níveis de ozono (UE, 2003).

Processo/Actividade	Impacte no ozono global troposférico (sinal)
Actividade humana- emissões de combustíveis fósseis	Pequeno (0)
Queima de biomassa	Médio a grande (\pm)
NO _x emitido pelo solo	Médio (0)
NO _x produzido em trovoadas	Médio a grande (+)
Emissões naturais de CH ₄	Médio a grande (+)
Emissões naturais de COV	Médio a grande (+)
Emissões oceânicas de gases com enxofre	Pequeno (0)
Química heterogénea em sais marinhos	Pequeno (-)
Química heterogénea em poeiras minerais	Pequeno-médio (-)
Compostos organo-halogenados	Desconhecido (-)
Alterações na deposição seca	Médio (0)
Alterações na deposição húmida	Pequeno a médio (-)
Efeito da meteorologia na produção e remoção de ozono	Grande (-)
Cobertura nebulosa	Pequeno (-)
Alterações na troca estratosfera-troposfera induzidas pelas variações no clima	Grandes (+)
Alterações nos padrões de tempo	Desconhecido (0)

2.4 Alterações da composição química da atmosfera: cenários futuros de emissões

A composição da atmosfera no futuro será determinada pela resposta dada a alterações nas actividades humanas, e consequente emissão de compostos gasosos e particulados, especificamente as que estão relacionadas com o consumo de combustíveis fósseis, com a intensidade da actividade industrial e com a extensão e natureza das mudanças no uso do solo. Além disso, as emissões produzirão alterações nos sumidouros atmosféricos de compostos secundários, como por exemplo, o O₃, OH[•], e o H₂O₂. A futura composição da atmosfera prevê-se ser também afectada pelas alterações climáticas através de alterações do ciclo hidrológico, na temperatura e na circulação atmosférica. Há ainda que considerar a importância das variações futuras da abundância e distribuição do ozono estratosférico, distribuição de nuvens e aerossóis na troposfera e o seu impacte nas variações de radiações

solar, de pequeno comprimento de onda, e consequente alterações das taxas a que os compostos químicos são destruídos na atmosfera (Brasseur *et al.*, 2003).

A forma como as sociedades evoluirão no futuro e as opções que tomarem em termos de produção de energia primária, determinarão em grande medida quais as concentrações de poluentes primários e secundários na atmosfera. Em 2000, o IPCC reuniu cerca de quarenta cenários de emissões de gases de efeito de estufa e de aerossóis para a atmosfera, agrupados em 4 famílias tipo, A1, A2, B1 e B2 (Figura 2.11) num relatório que intitulou de *Special Report on Emission Scenarios*, abreviadamente conhecido por SRES (IPCC, 2000). Segundo este relatório, as emissões de gases de efeito de estufa resultam de sistemas dinâmicos muito complexos e são determinadas por agentes forçadores como sejam o desenvolvimento socio-económico, demográfico e as alterações na tecnologia existente, cuja evolução futura é altamente incerta. Os cenários constituem imagens alternativas de como o futuro poderá decorrer representando uma ferramenta muito útil, por um lado, na análise das evoluções dos agentes forçadores de emissões e as incertezas a elas associadas e, por outro, na análise de alterações climáticas, incluindo a modelação climática e a avaliação de impactes, adaptação e mitigação às alterações climáticas.

As emissões decorrentes de cada cenário reflectem as premissas de evolução económica, demográfica, e de desenvolvimento tecnológico impostas para um determinado horizonte de tempo. Embora cada cenário seja igualmente possível, para cada família tipo escolheu-se um cenário marcador, ou padrão, a ser aplicado pelas diferentes equipas de modeladores na quantificação das emissões deles resultantes. Ou seja, cada cenário marcador está associado a uma família de cenários e pretende-se que descreva adequadamente a filosofia de desenvolvimento que está por trás de cada família de cenários. O facto de a família A1 apresentar um desenvolvimento económico mais rápido implicou a escolha de mais dois cenários extra para esta família, os cenários ilustrativos, que exploram diferentes desenvolvimentos de tecnologia ligada à energia na quantificação das emissões de GEE e aerossóis resultante desse percurso.

A Figura 2.11 pretende mostrar, de forma esquemática, como se agrupam os cenários SRES e as emissões a que dão origem. Os cenários marcadores e os cenários ilustrativos da família A1 têm por base hipóteses harmonizadas (CH) relativamente aos pressupostos de crescimento populacional global, de produto interno bruto e de energia final. Os restantes cenários (OC) exploram as incertezas associadas aos agentes forçadores das emissões nas hipóteses subjacentes aos cenários harmonizados.

Cada um destes cenários terá um impacte diferente no clima, pois as emissões deles resultantes têm associado um potencial energético diferente consoante as fontes de produção energética. A energia que se pode acumular nestas fontes está intimamente relacionada com o destino final da remoção de matéria orgânica produzida e que Peixoto (1981) descreve como: a fotossíntese fixa o carbono, armazena energia solar sob a forma de hidratos de carbono, liberta oxigénio e dissipa energia aquando da queda da folha. Quando parte da matéria orgânica sintetizada se deposita em meios com deficiência de oxigénio, há condições para o armazenamento de energia. É este o mecanismo que está na

base da formação dos combustíveis fósseis e para o qual é necessário um horizonte de 1 milhão de anos.

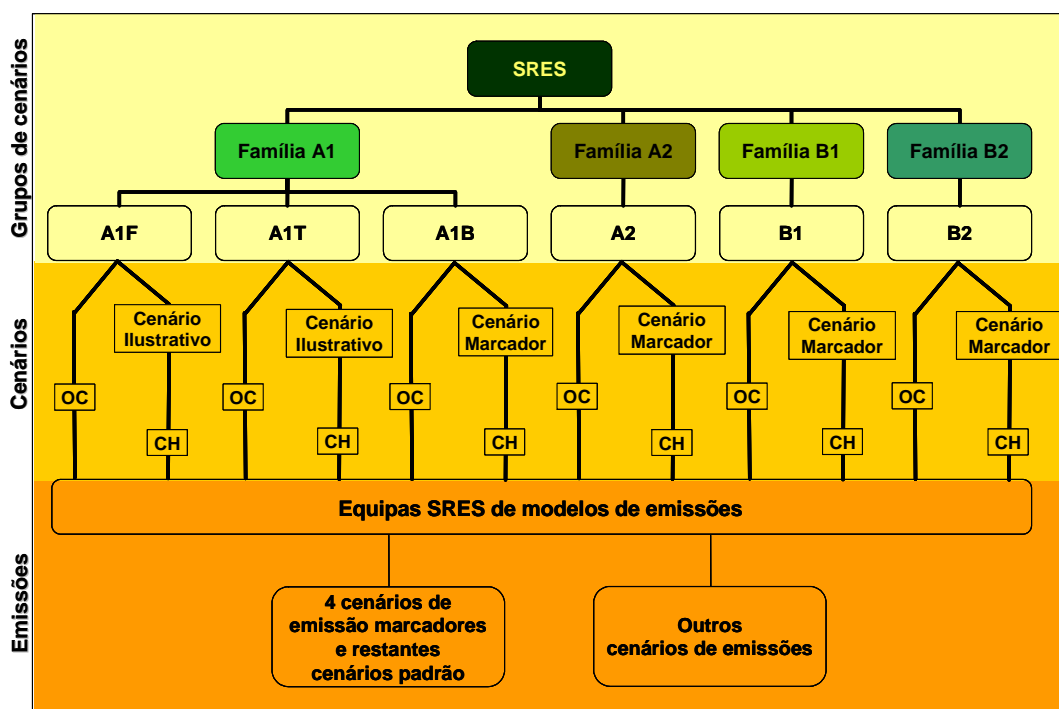


Figura 2.11: Ilustração esquemática dos cenários SRES, onde CH = cenário harmonizado, OC = outros cenários (adaptado de IPCC, 2000).

O potencial energético armazenado nos combustíveis fósseis tem sido introduzido na atmosfera através da sua combustão há cerca de duas centenas de anos. Como se mostrou, os gases resultantes deste processo introduziram e continuarão a introduzir perturbações relativamente rápidas na atmosfera. A desproporção entre o tempo necessário à acumulação de energia e o intervalo de tempo em que esta se tem utilizado tem preocupado a comunidade científica, desde os anos 90 do Século XX, no que toca às emissões de poluentes atmosféricos associadas ao gasto energético e ao seu potencial de aquecimento respectivo.

Capítulo 3

3 Modelação numérica e estimativa de emissões

A modelação numérica de qualquer processo constitui uma ferramenta fundamental no auxílio à compreensão do fenómeno em causa. Devido à sua natureza não reprodutível no tempo, o estudo de processos atmosféricos, tanto físicos e químicos, tem beneficiado da aplicação de modelos numéricos no que se refere à compreensão do fenómeno em si como à possibilidade que se levanta na melhoria do sistema de observação implementado para a sua monitorização.

A aplicação de modelos numéricos tem sido a forma, por excelência, de analisar a interacção dos vários sistemas termodinâmicos, já citados no Capítulo 2, devido à sua complexidade e não linearidade. Constituindo a base de trabalho na estimativa de alterações no clima e na avaliação dos seus impactes nas diversas actividades socio-económicas e nos ecossistemas.

Um dos objectivos deste trabalho consistiu na avaliação dos impactes de eventuais alterações no clima em Portugal, resultantes de um cenário de emissões de GEE associados a um conjunto de pressupostos de desenvolvimento. Para tal foi necessário recorrer a uma cascata de modelos incluindo um modelo de circulação geral, um modelo meteorológico e um modelo fotoquímico, ambos de meso-escala. O presente capítulo pretende introduzir o sistema de modelos MM5-CAMx usados na modelação fotoquímica da qualidade do ar, e os pressupostos admitidos na quantificação de emissões, e na sua desagregação em grelha, necessárias à estimativa de concentrações de poluentes atmosféricos.

3.1 O modelo meteorológico MM5

O modelo *Fifth Generation NCAR/Penn State Mesocale Model*, vulgarmente denominado MM5, é um modelo meteorológico não hidrostático, com coordenadas sigma *terrain-following*, destinado a simular ou prever circulações atmosféricas à escala regional (Dudhia, 1993). Este modelo foi desenvolvido pelo National Center for Atmospheric Research (NCAR), nos Estados Unidos da América, como um modelo comunitário de meso-escala, o qual tem sido continuamente melhorado e testado pelos seus utilizadores, quer nas universidades, quer em laboratórios governamentais. Os melhoramentos incluídos ao longo do tempo no modelo reflectem-se, hoje em dia, na sua capacidade de executar

nestings múltiplos, assumindo dinâmica não hidrostática, permitindo a assimilação de dados nas 4 dimensões, e incluindo uma miríade de opções físicas de cálculo da camada limite, parametrização de cúmulos, esquemas radiativos, esquemas explícitos de humidade, entre outros (URL 2).

A informação necessária para a aplicação do MM5 refere-se a dados de topografia e uso de solo, análise meteorológica em grelha proveniente de um modelo de escala global ou regional (vento, temperatura, humidade relativa, pressão média ao nível do mar, entre outros parâmetros meteorológicos) e dados meteorológicos observados (radiossondagens e dados de superfície). O modelo é constituído por vários módulos que têm como finalidade transformar dados existentes em diferentes bases, de terreno e meteorológicas de escala global, em formato requerido pelo modelo MM5.

A Figura 3.1 resume de forma esquemática os módulos numéricos que constituem o sistema MM5. O programa TERRAIN interpola os dados de topografia e uso do solo para a grelha de cálculo especificada, na projecção geográfica que melhor se adequa à região do globo onde se pretendem os resultados de simulação. O prognóstico a ser elaborado pelo módulo meteorológico tem de incluir condições iniciais e fronteira, usualmente resultantes de modelos de previsão numérica globais. Estes dados deverão ser interpolados horizontalmente para os níveis isobáricos da grelha anteriormente calculada. Esta etapa é executada através do programa REGRID. Contudo, frequentemente esta interpolação não fornece o detalhe necessário, e os dados meteorológicos interpolados podem ser melhorados com observações da rede de estações superficiais e de radiossondagens. Atendendo a que o modelo MM5 utiliza coordenadas verticais sigma é necessário interpolar verticalmente os dados meteorológicos, fornecidos em níveis isobáricos, para as coordenadas sigma (programa INTERPF). Finalmente, o módulo meteorológico MM5 resolve numericamente as equações da conservação da quantidade de movimento, massa, energia e humidade, fornecendo como resultados campos tridimensionais de temperatura, velocidade e direcção do vento, humidade relativa, pressão ao nível do mar e altura geopotencial.

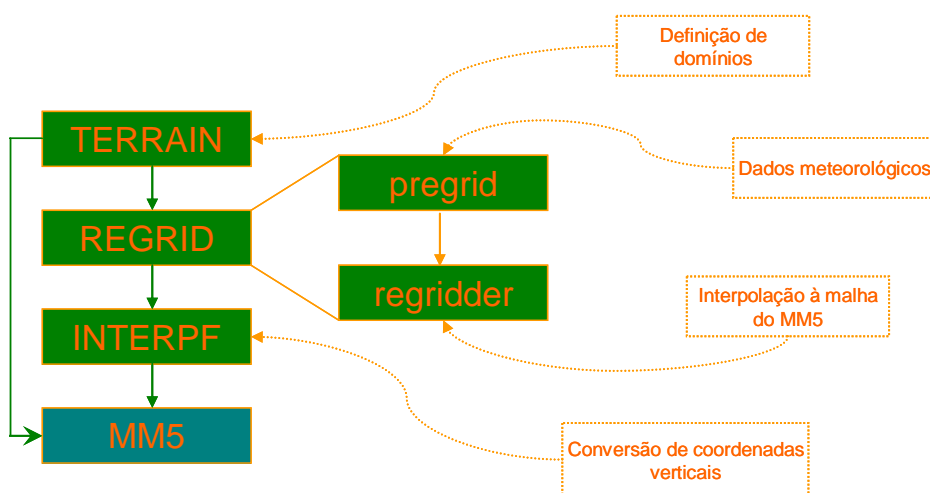


Figura 3.1: Módulos do sistema de modelação MM5.

A descrição anterior pretende apenas resumir a interligação entre os vários módulos usados no sistema de modelação MM5. Para se poder compreender melhor as necessidades de dados de entrada associadas aos módulos que compõem o sistema MM5, e às opções possíveis de tomar na sua execução, ir-se-á aplicar maior detalhe na sua descrição.

O programa TERRAIN interpola horizontalmente a topografia e as classes de uso do solo a partir de dados globais em grelha latitude-longitude para os domínios de meso-escala seleccionados. Para tal, há que definir todos domínios de meso-escala a considerar em cada corrida, ou seja, as malhas de grelha grosseira e de grelhas de maior resolução (finas), e de que forma elas irão interagir posteriormente na simulação de prognóstico meteorológico. Esta interacção entre domínios pode ser unidireccional ou bidireccional. Na primeira a informação do domínio de resolução grosseira é passada ao domínio de maior resolução através das condições fronteira impostas a este, enquanto que na interacção bidireccional, para além da passagem da informação através das condições fronteira há uma substituição dos resultados obtidos no domínio mais bem resolvido pelos resultados do domínio menos bem resolvido sobre as áreas que possuem em comum. Este programa também calcula alguns campos de constantes necessários para o sistema de modelação: latitude e longitude, factores de escala dos mapas associados aos domínios e parâmetro de Coriolis.

Tabela 3.1: Fontes de dados de elevação do terreno*

Resolução	Fonte de dados	Cobertura
1 grau (111,0 km)	PSU/NCAR	GLOBAL
30 min. (55,0 km)	PSU/NCAR	GLOBAL
10 min. (18,5 km)	USGS	GLOBAL
5 min. (9,25 km)	USGS	GLOBAL
2 min. (3,70 km)	USGS	GLOBAL
Mosaicos de 30 segundos (0,925 km)**	GTOPO30 pelo USGS	GLOBAL (33 mosaicos: 40° lon x 50 ° lat ou 60° lon x 30 ° lat)

*excepto para os dados de mosaico de 30 segundos (GTOPO30), a reconstrução de dados a partir de dados originais foi previamente executada.

**Para mais detalhes com respeito a GTOPO30 ver, <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.asp>

Sistematizando, este programa é composto por quatro partes:

1. Dados de entrada que se constituem a partir de bases de dados existentes (ver Tabela 3.1);
2. Interpolação dos dados anteriores em latitude/longitude para a resolução de cálculo dos domínios seleccionados.

3. Ajustamento da interface de *nesting* e *feed back* (retro-alimentação);
4. Ficheiros de saída com a elevação de terreno, uso do solo e outros dados terrestres em formato do MM5.

Após este passo, segue-se a aplicação do módulo REGRID. Neste, os dados meteorológicos globais são lidos e transformados num formato intermédio através do subprograma *pregrid*. Seguidamente, o programa *regridder* interpola para a grelha do MM5 as variáveis meteorológicas necessárias ao funcionamento do modelo MM5, segundo o método escolhido pelo utilizador e usando a informação previamente calculada pelo programa TERRAIN. Os parâmetros meteorológicos cujos campos deverão fazer parte obrigatoriamente dos ficheiros de entrada do submódulo *regridder* são a temperatura, as componentes horizontais do vento, a humidade relativa, a altura dos níveis de pressão, a pressão ao nível do mar, a temperatura superficial do mar (SST) e os dados relativos à cobertura de neve (opcional).

O facto de este módulo se apresentar dividido em duas partes torna o MM5 bastante versátil em relação aos dados meteorológicos de entrada originados por modelos globais, quer sejam eles resultantes de modelos climáticos globais, modelos numéricos de prognóstico ou dados de reanálise. Para tal, substitui-se o programa *pregrid* por outro adequado à fonte de dados com interesse de forma a obter o formato intermédio necessário ao programa *regridder*. Esta característica modular permitiu desenvolver a interface utilizada na aplicação dos resultados do modelo de circulação global como gerador de condições iniciais e fronteira ao modelo MM5, na avaliação do impacte das alterações climáticas em Portugal que se irá desenvolver no Capítulo 6.

O programa INTERPF transforma os dados de análise/previsão meteorológica na forma adequada para o modelo de meso-escala, isto é, converte os dados armazenados em níveis de pressão para os níveis sigma utilizados pelo modelo MM5. Para tal, é necessário recorrer à interpolação vertical, ajuste físico dos campos e alteração do formato dos dados. O procedimento corrente deste módulo numérico consiste em calcular a pressão à superfície, seguida de uma interpolação das variáveis descritas em coordenadas de pressão para coordenadas sigma hidrostáticas, em que as variáveis u , v e humidade relativa se relacionam linearmente com a pressão enquanto que a temperatura potencial é linear com o logaritmo natural da pressão. Neste sistema de coordenadas verticais, os níveis sigma junto ao solo tendem a seguir o terreno enquanto que para os níveis mais elevados tendem a aproximar-se das superfícies isobáricas.

De forma a minimizar o ruído das condições iniciais remove-se a divergência média integrada, reduzindo movimentos verticais falsos, possivelmente introduzidos nos dados meteorológicos durante o processo de análise dos dados. Seguidamente, calcula-se o estado base, necessário para o cálculo dos níveis sigma não-hidrostáticos, a partir de algumas constantes. Para tal é necessário indicar previamente o valor da temperatura e pressão à superfície, o perfil de temperatura, a expressão analítica para a pressão de referência, a altitude das superfícies sigma não-hidrostáticas, e a informação relativa à elevação do terreno. Por fim, inicializam-se as variáveis necessárias à dinâmica não hidrostática, velocidade vertical e à perturbação da pressão.

O MM5 é o módulo do sistema de modelação meteorológica propriamente dito que executa a previsão numérica, podendo ser usado num amplo espectro de estudos teóricos e em tempo real, incluindo aplicações tanto em simulações de previsão como assimilação de dados em monções, furacões e ciclones. Para as escalas mais pequenas, meso-beta e meso-gama (2-200 km), o MM5 pode ser utilizado em estudos que envolvam sistemas convectivos de meso-escala, nomeadamente sistema frontais, brisas de mar e terra, circulações de montanha e vale, e ilhas de calor urbano. A formulação física para as variáveis básicas não hidrostáticas consideradas no modelo, em coordenadas *terrain-following* (x, y, σ) são pressão, quantidade de movimento (componentes x , y e z) e termodinâmica. Existem também equações de prognóstico para outras variáveis meteorológicas, nomeadamente vapor de água e nuvens. As opções físicas possíveis de seleccionar relacionam-se com as parametrizações no cálculo de variáveis relacionadas com processos cuja escala é inferior à resolução da malha, ou seja, processos da camada limite, nomeadamente, difusão vertical, cúmulos, humidade, radiação e esquemas superficiais. Os esquemas de cúmulos representam os fluxos verticais e de precipitação devidos a nuvens convectivas de escala inferior à da simulação pretendida. Desde que a resolução da malha seja suficientemente grande (menor ou igual a 5 km) para resolver os movimentos ascensionais e descensionais não é necessário explicitar qualquer parametrização de cúmulos. Caso contrário existem várias opções aplicáveis a diferentes resoluções de grelha e situações de aplicação, como por exemplo, nos trópicos.

Os esquemas de microfísica tratam das nuvens e precipitação à escala de resolução da simulação. Fornecem como resultados as tendências de temperatura, os valores associados a todas as variáveis relacionadas com a humidade, a quantidade de precipitação não convectiva à superfície, e ainda indicam ao esquema radiativo a informação resultante sobre as nuvens.

Os esquemas radiativos representam os efeitos radiativos na atmosfera e à superfície da terra. O resultado do esquema aplicado irá fornecer os valores dos fluxos de radiação de pequeno e grande comprimento de onda aos esquemas de superfície que, por seu lado, irá determinar a temperatura do solo.

Os esquemas de opções físicas para a camada limite representam os fluxos verticais devidos aos fenómenos de turbulência que ocorrem na camada limite atmosférica. Distinguem-se entre si pela forma como tratam a camada limite com características instáveis. Fornecem como resultados tendências de calor, quantidade de movimento, humidade e efeitos de atrito. O seu cálculo está intimamente relacionado com os resultados produzidos pelo esquema de superfície.

A escolha das parametrizações dos diferentes processos é por vezes dependente entre si, reflectindo a interligação que existe entre os processos e, consequentemente entre os esquemas opcionais (Figura 3.2).

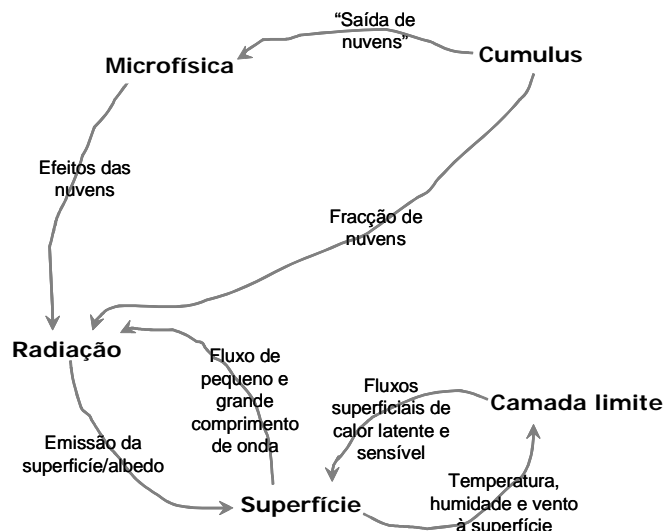


Figura 3.2: Interação directa entre as parametrizações físicas do MM5.

O modelo MM5 tem vindo a ser usado em Portugal em diferentes domínios de aplicação:

- em previsão numérica do estado do tempo, pelo Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa (URL 3), pela Universidade de Aveiro (URL 4) e pelo Instituto Superior Técnico (URL 5);
- em estudos sobre o potencial eólico em Portugal, pelo Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (URL 6),
- na regionalização de padrões climáticos resultantes de alterações climáticas (Borrego *et al.*, 2004);
- como agente forçador de modelos oceanográficos (Leitão *et al.*, 2003; Ferreira e Miranda, 2005);
- em estudos de qualidade do ar (Monteiro *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2004, Salmim, 2005).

No que se refere à sua avaliação este modelo foi validado sobre Portugal em diferentes condições sinóticas (Carvalho *et al.*, 2002; Aquilina *et al.*, 2005).

No Capítulo 5 apresenta-se a descrição e os resultados de aplicação do modelo MM5 a três domínios *nested* recorrendo aos dados de reanálise do Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF), a cada seis horas. Os dados de entrada resultam das simulações do modelo de circulação geral MUGCM, com ajuste das condições iniciais e fronteira a cada 24 horas, também sobre três domínios.

3.2 O modelo de qualidade do ar CAMx

O modelo fotoquímico CAMx, *Comprehensive Air quality Model with extensions*, é um modelo Euleriano que permite a avaliação integrada da poluição atmosférica fotoquímica e particulada numa gama de várias escalas, desde a urbana à regional (ENVIRON, 2004). Este modelo simula a emissão, dispersão, reacções químicas e remoção de poluentes na

troposfera através da resolução da equação da continuidade para cada espécie química num sistema de grelhas tridimensionais, com possibilidade de aplicação da técnica de *nesting*.

A equação da continuidade Euleriana descreve a dependência temporal da concentração média da espécie I no volume ocupado por cada célula como o somatório de todos os processos físicos e químicos que se fazem sentir nesse volume. A sua expressão matemática em coordenadas ajustadas ao terreno (*terrain-following*) é:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_I}{\partial t} = & -\nabla_H V_H c_I + \left[\frac{\partial(c_I \eta)}{\partial z} - c_I \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \right] + \nabla \bullet \rho K \nabla \left(\frac{c_I}{\rho} \right) + \\ & + \frac{\partial c_I}{\partial t} \Big|_{química} + \frac{\partial c_I}{\partial t} \Big|_{emissões} + \frac{\partial c_I}{\partial t} \Big|_{remoção} \end{aligned} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde, V_H é o vector horizontal do vento, η é a taxa de *entrainment*¹ vertical, h é a altura vertical de interface, ρ é a massa volúmica atmosférica, e K é o coeficiente de difusão turbulenta. O primeiro termo do segundo membro representa a advecção horizontal, o segundo termo representa o transporte vertical através de uma superfície arbitrariamente posicionada na vertical, e o terceiro termo representa a difusão turbulenta. A produção ou remoção química de uma espécie é representada pela resolução simultânea de equações de reacção definidas a partir da escolha de um determinado mecanismo químico. A remoção de poluentes atmosféricos dá-se tanto por deposição húmida como seca.

Este modelo comporta cinco mecanismos químicos distintos, quatro baseados no *Carbon Bond Mechanism*, versão 4, (CB-IV) e outro no mecanismo SAPRC99 (ENVIRON, 2004). Neste trabalho usou-se a forma mais simplificada do mecanismo CB-IV, que inclui 91 reacções e 24 espécies gasosas, sendo os compostos orgânicos voláteis desagregados em 12 espécies de acordo com os diferentes tipos de ligações de carbono existentes, pois é com base neste mecanismo que se têm validado os estudos de qualidade do ar com este modelo fotoquímico.

O CAMx apresenta vários tipos de projecção para o plano horizontal, a projecção polar estereográfica e a projecção *Lambert conformal*, para além da tradicional *Universal Transverse Mercator* (UTM), permitindo que o modelo possa ser acoplado a qualquer modelo meteorológico de prognóstico. No presente estudo este acoplamento fez-se com os resultados do modelo MM5 acima descrito, calculados em projecção *Lambert Conformal* e a opção UTM do CAMx, para haver conformidade com a projecção subjacente à discretização em malha das emissões de gases atmosféricos.

O modelo CAMx necessita de dados de entrada que representem as características sobre o domínio de simulação no que se refere à descrição das condições fotoquímicas, das características da superfície, das condições iniciais e de fronteira, das taxas de emissão dos

¹ Taxa de *entrainment*, ou velocidade de *entrainment*, é uma medida do volume de ar da troposfera livre que entra na camada de mistura, por unidade de área horizontal e de tempo.

diferentes poluentes e dos vários campos meteorológicos (Tabela 3.2). A preparação desta informação requer vários passos para transformar os dados de emissões, meteorologia, qualidade do ar entre outros dados, no formato final dos ficheiros de entrada no CAMx.

Tabela 3.2: Dados de entrada do CAMx (ENVIRON, 2004).

CLASSES DE DADOS	TIPO DE DADOS
Meteorologia (Resultados do modelo MM5)	Campos tridimensionais de: Componentes horizontais do vento Temperatura Pressão Vapor de água Difusividade vertical Nuvens/chuva
Qualidade do Ar (Obtidos através de valores medidos de concentração de poluentes)	Concentrações iniciais por célula de cálculo; Concentrações fronteira laterais; Concentrações no topo do domínio, constantes no tempo e no espaço
Emissões (Provenientes dos inventários de emissões)	Fontes pontuais; Fontes em área: móveis, industriais e biogénicas.
Geografia (Fornecida por mapas de uso e cobertura de solo)	Uso do solo e cobertura vegetal para cada célula de cálculo Códigos de albedo de superfície para cada célula de cálculo
Outros Coluna de ozono através de dados da TOMS Razões de fotólise através de modelos radiativos	Estrutura vertical do domínio de simulação Propriedades radiativas da atmosfera Códigos de opacidade em grelha Códigos da coluna de ozono Tabelas de taxas de fotólise

Na Tabela 3.3 encontram-se as representações físicas do CAMx para cada termo da equação da continuidade de cada poluente. Esta equação calcula-se de forma numérica através de uma sucessão de passos temporais. Em cada passo temporal, e em cada célula do domínio, a equação da continuidade é substituída pelos novos valores calculados para cada processo que intervém na variação da concentração de cada poluente (advecção, difusão e química).

A advecção é calculada separadamente nas três direcções do espaço. Contudo, desenvolveu-se uma ligação numérica entre estas três componentes que contempla o balanço de massa de forma a preservar o campo de massa volúmica em cada passo temporal.

Quando se opta por uma simulação recorrendo à capacidade de *nesting*, o modelo determina internamente um passo temporal principal de modo a assegurar a estabilidade numérica na advecção horizontal sobre um domínio de resolução mais baixa. Os valores de passo temporal variam entre os 5 e os 30 minutos, para resoluções de célula entre os 10 e os 50 km, apresentando valores da ordem do minuto, ou mesmo inferiores, quando a

resolução espacial do domínio aumenta para 1-2 km (Figura 3.3). Assim, os cálculos efectuados nos termos de transporte em domínios *nesting* requerem vários passos temporais que encaixem no passo temporal importante do domínio de resolução grosseira, número esse que depende das resoluções relativas entre os domínios de menor e maior resolução. Por cada passo temporal de transporte há um múltiplo de passos temporais químicos para que as soluções das equações químicas numéricas sejam as adequadas.

Tabela 3.3: Processos presentes no CAMx e respectivos modelos físicos.

Processo	Modelo físico
Advecção/difusão horizontal	Equação da continuidade Euleriana com fecho pela teoria K
Transporte/difusão vertical	Equação da continuidade Euleriana com fecho pela teoria K
Química	Mecanismo Carbon Bond ou SAPRC99
Deposição seca	Modelos de resistências diferenciados para gases e aerossóis
Deposição húmida	Modelos separados para gases e aerossóis

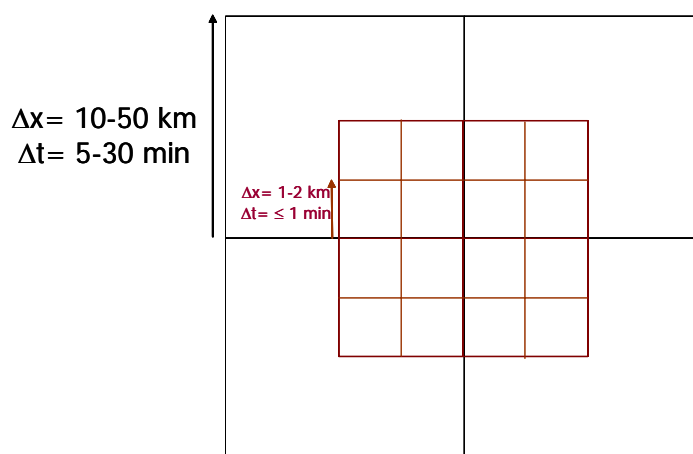


Figura 3.3: Relação entre a resolução espacial e temporal entre domínios de malha com resolução grosseira e fina.

Para cada célula do domínio, o primeiro processo a ser calculado em cada passo temporal é a contabilização das emissões de todas as fontes consideradas. Seguidamente, o CAMx calcula a advecção horizontal, mas alterna a ordem de advecção nas direcções x e y em cada passo temporal da grelha grosseira. Os passos seguintes incluem, por ordem de execução, a advecção vertical, a difusão vertical, a difusão horizontal, deposição húmida e a produção e/ou remoção química.

Embora a deposição seca seja um processo importante de remoção de compostos químicos da atmosfera não é tratada explicitamente em cada passo temporal. A abordagem seguida neste caso contém o cálculo da velocidade de deposição para cada espécie com base nas suas propriedades químicas e nas condições meteorológicas e da superfície onde ocorre o

processo de remoção. Este valor de velocidade de deposição aplica-se como condição fronteira inferior na equação de prognóstico da difusão vertical. Esta abordagem permite fazer o acoplamento apropriado entre a remoção à superfície em cada coluna de ar sobre uma dada célula e o processo de mistura vertical.

Tabela 3.4: Termos da equação da continuidade de cada espécie química.

Processo	Termo da equação da conservação da massa
Emissão	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{emissão}} = m^2 \frac{E_l \Delta t}{\partial x \partial y \partial z}$
Advecção	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{advecção-x}} = -\frac{m^2}{A_{yz}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u A_{yz} c_l}{m} \right)$
	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{advecção-y}} = -\frac{m^2}{A_{xz}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v A_{xz} c_l}{m} \right)$
Transporte vertical	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{transporte-z}} = \frac{\partial(c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)$
Difusão vertical	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{difusão-z}} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_v \frac{\partial \left(\frac{c_l}{\rho} \right)}{\partial z} \right]$
Difusão horizontal	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{difusão-xy}} = m \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[m \rho K_x \frac{\partial \left(\frac{c_l}{\rho} \right)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[m \rho K_y \frac{\partial \left(\frac{c_l}{\rho} \right)}{\partial y} \right] \right\}$
Deposição	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{deposição húmida}} = -\Lambda_l c_l$
Produção/remoção química	$\frac{\partial c_l}{\partial t} \Big _{\text{produção / remoção-química}} = \text{Mecanismo} - \text{equação de reacção específica}$

c_l - a concentração da espécie em $\mu\text{mol.m}^{-3}$;

E_l - taxa de emissão da espécie química $\mu\text{mol.s}^{-1}$;

Δt - passo temporal em segundos

u e v - componentes zonais e meridionais do vento em m.s^{-1} ;

A_{yz} e A_{xz} - as secções verticais dos planos XY e XZ, respectivamente, em m^2 ;

m - factor de distância, adimensional;

Λ_l - é a taxa de deposição húmida, em s^{-1}

A configuração da grelha do CAMx é uma Arakawa C (Figura 3.4) e, portanto, as variáveis de estado como a temperatura, a pressão, o vapor de água e a água das nuvens, e a concentração de poluentes são calculadas no centro da célula, enquanto que as componentes do vento e os coeficientes de difusividade são considerados nas fronteiras de cada célula de forma a quantificar a transferência de massa e a facilitar a resolução das equações de transporte na forma de fluxo.

O CAMx considera a concentração dos poluentes no centro do volume de cada célula o que representa a concentração média de toda a célula. Os campos meteorológicos são necessários na definição do estado da atmosfera para o cálculo do transporte e a química de cada espécie em cada célula.

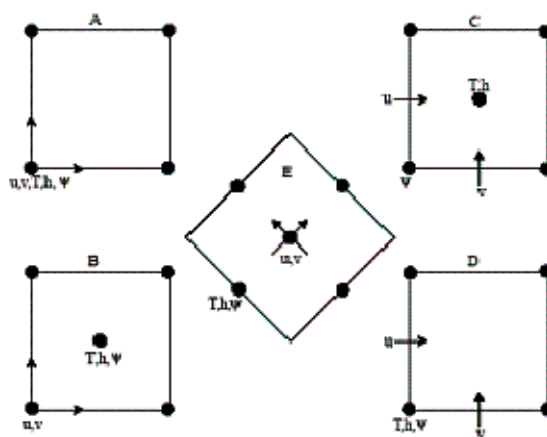


Figura 3.4: Representação esquemática da localização do cálculo das diferentes variáveis em diferentes tipos de malha Arakawa (Griffies *et al.*, 2000).

As variáveis com componente vertical calculam-se a meia distância entre camadas verticais, com excepção das variáveis que descrevem transporte de massa através das interfaces entre camadas, onde se incluem o coeficiente de difusão vertical K_v e a taxa de *entrainment* vertical, η . Estas variáveis são consideradas no centro da célula na horizontal, mas estão localizadas no topo de cada camada vertical.

A abordagem seguida na resolução do transporte de poluentes no CAMx garante tanto a conservação da massa como a consistência de massa. A conservação da massa diz respeito à capacidade de o modelo considerar todas as fontes e sumidouros sem que haja qualquer perda ou ganho de massa devido ao processo de integração. Em termos numéricos, o CAMx usa a massa volúmica das espécies químicas como concentrações e resolve as equações de advecção na forma de fluxo. A concentração é reduzida a razão de mistura volumétrica quando se processam os fenómenos de química e de difusão e, posteriormente, quando é escrita para os ficheiros de saída. Por outro lado, a consistência de massa representa a capacidade do modelo em transportar a massa de poluente de forma equivalente ao campo de quantidade de movimento atmosférico previamente fornecido.

As equações de transporte são escritas e resolvidas na forma de fluxo, e, portanto, os campos de variáveis meteorológicas de entrada serão todos transformados para uma grelha

Arakawa C, para uma optimização do cálculo da divergência do fluxo e assegurar ao mesmo tempo a conservação da massa. De forma a reduzir erros de interpolação entre grelhas de diferentes resoluções o modelo CAMx aceita os campos de variáveis meteorológicas (componentes horizontais do vento, pressão, temperatura, humidade, coeficientes de difusão vertical e parâmetros de nuvens) para cada grelha de maior resolução, se estas existirem.

Os campos de quantidade de movimento horizontal, específicos para cada grelha e para cada instante, são usados na determinação dos campos de velocidade vertical que balança a equação da continuidade química local para a configuração de grelha empregue. Uma vez que a estrutura vertical se fixa através de parâmetros externos ao modelo podem definir-se as alturas das interfaces das camadas como uma função arbitrária do tempo e/ou do espaço. Desta forma, o transporte vertical é a combinação da advecção vertical e da troca de massa entre camadas ondulantes.

A taxa total de transporte vertical refere-se como sendo a taxa de *entrainment* local, h , e define-se como sendo a combinação entre a velocidade vertical w e a taxa de variação temporal da altura das interfaces entre as camadas:

$$\eta = \frac{\partial h}{\partial t} - w$$

Equação 3.2

Em cada passo temporal, o perfil de velocidade vertical é determinado pela integração da equação da continuidade para fluidos incompressíveis.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho V$$

Equação 3.3

E que resulta em

$$\rho w(z) = -\int_0^z \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_H \cdot \rho V_H \right) dz$$

Equação 3.4

Onde a taxa de variação local da massa volúmica atmosférica, em cada célula, é fornecida pelos campos meteorológicos de entrada. O perfil de velocidade vertical é então o resultado de um balanço entre uma tendência de massa volúmica imposta e o resultado do cálculo da divergência da quantidade de movimento horizontal em cada célula da grelha, em cada passo temporal.

A consistência de massa é também garantida pela forma como o modelo CAMx calcula a divergência do fluxo horizontal da massa volúmica atmosférica e que é consistente com a usada no transporte horizontal de poluentes. A massa volúmica atmosférica é advectada de fora para dentro e de dentro para fora das células através da mesma equação usada para os poluentes

$$\nabla_H \cdot \rho V_H = \frac{m^2}{A_{yz}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u A_{yz} \rho}{m} \right) + \frac{m^2}{A_{xz}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v A_{xz} \rho}{m} \right)$$

Equação 3.5

As taxas de fotólise são calculadas para cada grelha do domínio como função de cinco parâmetros, assumindo que as condições são de céu limpo:

1. ângulo do Zénite Solar;
2. altitude;
3. coluna total de ozono;
4. albedo superficial;
5. turbidez atmosférica.

Estas taxas podem ser significativamente afectadas pela presença de nuvens e o CAMx trata o impacte da presença deste elemento a partir de informação do percurso (profundidade) óptico das nuvens para cada célula, atenuando a taxa de fotólise em camadas onde haja diminuição dos raios ultravioleta devido à presença de nuvens ou aumentando-a devido à reflexão de UV por nuvens em camadas mais baixas.

Este modelo, acoplado ao modelo MM5 e definindo o mecanismo mais simples identificado previamente, tem sido aplicado a domínios em Portugal, revelando um bom desempenho, inclusivamente quando comparado com outros modelos fotoquímicos (Ferreira *et al.*, 2003; Ferreira *et al.*, 2004 e Salmim, 2005).

Em Ferreira *et al.*, 2003 aplicou-se o sistema de modelos MM5-CAMx à região de Aveiro a um período de tempo incluído numa campanha de monitorização da qualidade do ar levado a cabo em 2001. Esta campanha teve como objectivo caracterizar, no tempo e no espaço, as concentrações de ozono e precursores, durante os ciclos diurnos de movimentos termicamente induzidos. As condições meteorológicas associadas ao período de simulação diziam respeito a uma situação anticiclónica sobre Portugal e o sistema de modelos mostrou ter um bom desempenho na determinação dos máximos de ozono ocorridos nas estações de qualidade do ar que se consideraram no domínio geográfico da campanha.

O estudo comparativo entre o desempenho de dois sistemas de modelos para estimativa da qualidade do ar sobre Portugal continental durante um episódio de ozono ocorrido em Portugal entre 27 e 30 de Maio de 2001 mostrou que o sistema MM5-CAMx apresenta melhores correlações com as medições de ozono na faixa litoral Norte do que no Sul do País (Ferreira *et al.*, 2004). Nesta região, os resultados do modelo fotoquímico parecem estar condicionados pelos resultados menos bons do modelo meteorológico (Salmim, 2005).

3.3 Estimativa de Emissões

A base de dados de emissões CORINAIR/EMEP (*CO-ordinated Information on the Environment in the European Community – AIR/ European Monitoring and Evaluation Programme*) (EEA, 2002) tem como objectivo facilitar o acesso a dados de emissões de poluentes gasosos, reportados pelos países signatários da Convenção sobre o Transporte Transfronteiriço da Poluição Atmosférica (CLRTAP - *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*). Os poluentes que constam desta base incluem o SO₂, os NO_x, compostos orgânicos voláteis não metano (COVNM), a amónia (NH₃), o CO, matéria

particulada, poluentes orgânicos persistentes e metais pesados. Para cada um destes poluentes é possível consultar os totais nacionais, totais por sector de actividade e emissões em grelha. Para o domínio sobre toda a Europa (Figura 3.5), em projecção polar estereográfica, é possível obter esta informação em duas resoluções de grelha distintas, 150 km x 150 km e 50 km x 50 km, em base anual, entre 1990 e 2003 (URL 7).

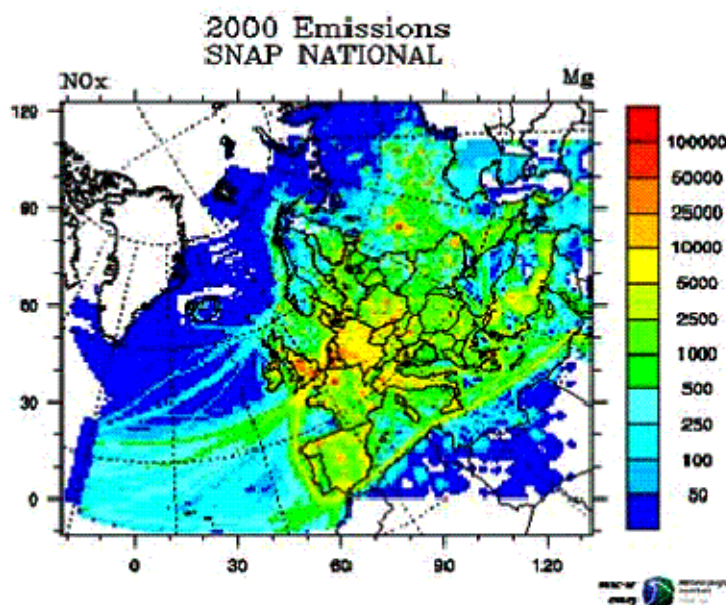


Figura 3.5: Emissões de NO_x em toda a Europa, ano 2000 (unidades $\text{Mg NO}_2 \text{ano}^{-1}$), (URL 7).

As emissões usadas nas simulações de qualidade do ar nesta dissertação foram recalculadas para a resolução de malha respectiva a partir das emissões CORINAIR/EMEP em grelha de 50 km x 50 km, para o ano de referência de 2001. O inventário de emissões CORINAIR/EMEP disponibiliza informação ao nível nacional (NUT I), desagregada por tipo de actividade e por poluente. No entanto, a utilização dos dados de emissões em estudos científicos, nomeadamente na modelação da qualidade do ar, exige um nível de resolução mais elevado, tendo sido necessário desenvolver um procedimento que permitisse uma desagregação espacial e temporal mais detalhada. Assim, o inventário CORINAIR/EMEP, os factores de desagregação admitidos para aumentar a resolução das emissões sobre Portugal juntamente com os dados das grandes fontes pontuais nacionais constituem a base de dados de emissões POLAR2 (Monteiro *et al.*, 2001).

O interesse particular deste trabalho no inventário de emissões reside na aplicação de modelos fotoquímicos a diferentes condições meteorológicas. Desta forma, nem todos os poluentes atmosféricos são primordiais, sendo os mais importantes os óxidos de azoto (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV). Contudo, o inventário CORINAIR/EMEP apenas possui informação referente a COVNM. De modo a obter dados relativos ao metano (CH_4), calculou-se a razão CH_4/COVNM a partir do inventário de emissões do IPCC (URL 8). Assumindo que essa relação se mantém no inventário CORINAIR/EMEP,

calculou-se a emissão de CH₄ anual a partir dos valores de COVNM deste último inventário.

As grandes fontes pontuais (Figura 3.6) foram inventariadas e as suas emissões actualizadas através de dados de medições fornecidos pelas próprias indústrias.

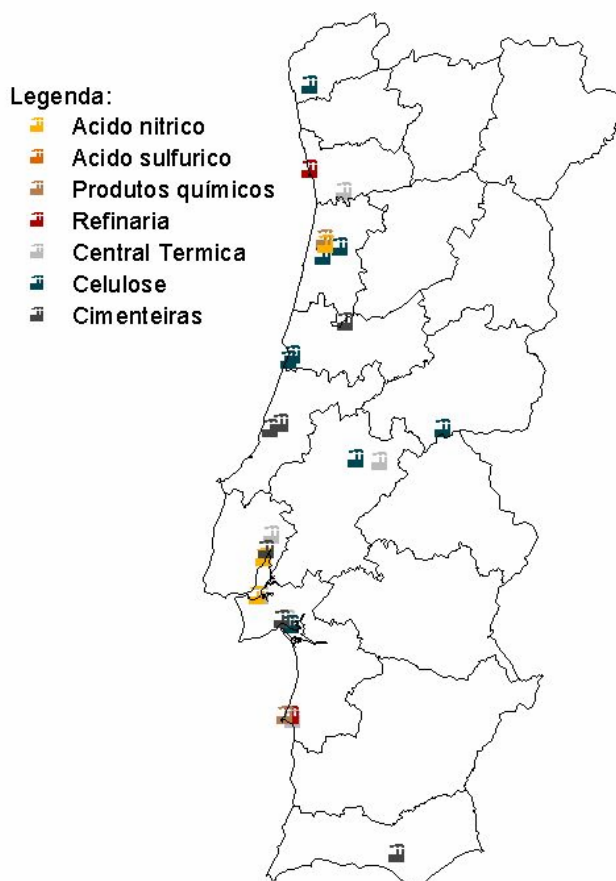


Figura 3.6: Distribuição espacial das grandes fontes emissoras (pontuais).

As fontes em área encontram-se divididas num conjunto de sectores de actividade, agrupados nas seguintes categorias: combustão residencial e comercial; combustão industrial; processos de produção; transportes rodoviários, aeroportos, outras fontes móveis; extração e distribuição de combustíveis; tratamento e deposição de resíduos; agricultura e ainda a floresta. A desagregação espacial destas fontes em área foi feita recorrendo a factores de ponderação disponíveis, para o ano base de 2001, e considerados adequados a cada uma das actividades em análise (Monteiro *et al.*, 2001). Assim, numa primeira fase, as emissões nacionais do inventário CORINAIR/EMEP foram desagregadas até ao nível NUT IV (concelhos) e em seguida desagregadas até ao nível de maior resolução espacial, NUT V (freguesias). Os factores socio-económicos usados na desagregação estão descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Factores socio-económicos usados na desagregação espacial das emissões em área (Monteiro *et al.*, 2001).

ACTIVIDADE CORINAIR/EMEP	NUT I → NUT IV (Concelho)	NUT IV → NUT V (Freguesia)
Combustão residencial e comercial	Consumo combustíveis por concelho	Census - população activa total
Combustão industrial	Consumo combustíveis por concelho	Census – pop. sector secundário
Processos de produção	Consumo combustíveis por concelho	Census – pop. sector secundário
Transportes rodoviários	Consumo gasolina por concelho	Census - população activa total
Outras fontes móveis	Consumo gasóleo por concelho	Census – pop. sector primário
Extracção/distribuição combustíveis	Consumo gasolina por concelho	Census - população activa total
Tratamento/deposição de resíduos	Despesas C.M. no tratamento resíduos	Census – população activa total
Agricultura	Área agrícola por concelho	Census – pop. sector primário
Floresta		Área florestal por freguesia

No que se refere à desagregação espacial das emissões as metodologias variam consoante a quantidade de informação disponível sendo a base o inventário CORINAIR/EMEP. Significa isto que nos domínios definidos sobre os quais se apresenta o território espanhol as áreas que lhe dizem respeito foram apenas interpoladas para uma malha de maior resolução, em projecção UTM, enquanto que sobre Portugal as emissões são calculadas em grelha conforme a descrição anterior, na mesma projecção.

Particularizando, no Capítulo 5 recorreu-se à técnica de *nesting* do CAMx para avaliar as concentrações de ozono em episódios identificados para este poluente. A malha de emissões com menor resolução (30 km x 30 km) abrange toda a Península Ibérica, enquanto que o domínio de maior resolução (10 km x 10 km) cobre Portugal continental, a região autónoma da Galiza e uma faixa de território espanhol a Este do nosso país. A título ilustrativo, a Figura 3.7 apresenta as emissões estimadas, com base na metodologia descrita, de NO_x totais anuais sobre a Península Ibérica e as emissões totais anuais de COVNM em Portugal, com resolução de malha de 10 km x 10 km, referentes ao ano base de 2001 e que se usaram como dados de entrada ao modelo fotoquímico CAMx.

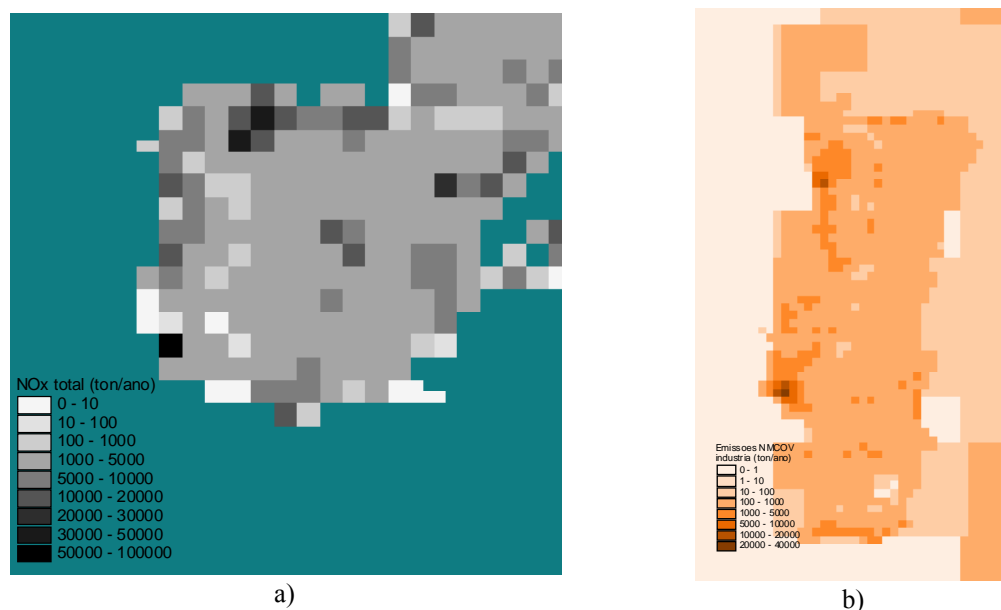


Figura 3.7: Emissão total anual de (a) NO_x sobre a Península Ibérica, resolução 30 km x 30 km e (b) COVNM sobre Portugal, 10 km x 10 km, em 2001.

No Capítulo 6, dada a especificidade do desenvolvimento da aplicação a Portugal, sobretudo no que se refere aos pressupostos admitidos para a estimativa de emissões em 2050, apenas se consideraram as emissões sobre o domínio de maior resolução, ou seja sobre Portugal e regiões fronteiriças ao nosso país (Figura 3.7 b). As emissões em cenário de clima actual foram estimadas para 1990, partindo das do ano base de 2001 e recorrendo a um factor de correcção.

Capítulo 4

4 O ozono na baixa troposfera em Portugal

“Quem não sabe prestar contas de três milénios permanece nas trevas ignorante e vive o dia que passa”.

Esta frase pertence a Johann W. Goethe (in Gaarder, 1996) e inicia uma história pela Filosofia. Pode também estabelecer um início de caminho na preocupação deste estudo sobre o impacto das alterações climáticas na qualidade do ar em Portugal. Neste sentido, o trabalho incluído neste capítulo pretende contribuir para o conhecimento da qualidade do ar recorrendo ao estudo de séries temporais longas de poluentes, nomeadamente o ozono e seus precursores, e quais as tendências que se observaram nas suas concentrações nos últimos anos em Portugal.

O ozono encontra-se concentrado sobretudo em duas regiões da atmosfera terrestre. Cerca de 90 % está a 8-18 km acima da superfície terrestre e estende-se numa camada que pode atingir os 50 km de altura, ou seja a estratosfera, sendo conhecida também designada como a camada de ozono. Os 10 % de ozono restantes encontram-se na baixa troposfera, estando a sua formação na camada superficial ligada aos ciclos sazonais e diurnos de temperatura e radiação solar (Figura 4.1), ao qual vulgarmente se designa como ozono resultante do *smog* fotoquímico.

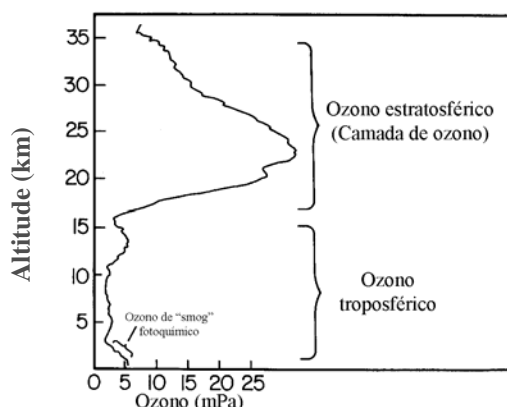


Figura 4.1: Distribuição vertical de ozono na atmosfera (adaptado de WMO, 1998).

4.1 Medições de ozono, um pouco de história

A importância do ozono fotoquímico junto à superfície surgiu em plena Segunda Guerra Mundial quando os habitantes da cidade de Los Angeles, nos Estados Unidos da América, se começaram a aperceber das consequências negativas para a saúde da sua cidade muito industrializada (URL 9). O Jornal *Los Angeles Times* de 26 Julho de 1943 reportou que um “manto de fumo” se abateu sobre a cidade durante uma onda de calor, alterando a visibilidade em três quarteirões (Figura 4.2), causando irritabilidade ocular e das vias respiratórias nos seus habitantes. Na sequência deste episódio nasceu em 1947 o primeiro programa de poluição atmosférica dos Estados Unidos em Los Angeles.

Em 1948 iniciaram-se os primeiros estudos do efeito do *smog* fotoquímico em plantas e em 1950 Hagen-Smith, Professor do Instituto de Tecnologia da Califórnia, mostrou o efeito adverso de concentrações elevadas de ozono sobre plantas em laboratório, na deterioração de materiais, especialmente borrachas, e também na saúde humana.

Este assunto começou a ser amplamente debatido na primeira conferência internacional de poluição atmosférica realizada em Nova Iorque, em 1955, depois de vários episódios de *smog*, nem todos eles fotoquímicos, levarem à morte milhares de pessoas como os de Donora Penn (1948), Londres (1951 e 1956), Nova Iorque (1953) e novamente em Los Angeles em 1954 (URL 10). A tomada de consciência e a determinação das causas deste problema de saúde pública levou a que as primeiras leis em matéria de qualidade do ar fossem aprovadas pelo Senado Americano em 1955 e pelo Parlamento Britânico em 1956.



a)



b)

Figura 4.2: Registos fotográficos do *smog* fotoquímico a) em Los Angeles, 1943 (URL 9) e b) Londres, 1951 (URL 11).

Contudo, o reconhecimento dos efeitos da poluição atmosférica na saúde não remontam apenas à era industrial. A título de curiosidade note-se que no ano 61 AC, Seneca, o filósofo romano, registou a sua alteração de humor quando saía de Roma (URL 12), “mal saí do ar pesado de Roma e do mau cheiro das chaminés fumarentas que delas saem, os

quais, sendo agitados, derramam os vapores pestilentos e a fuligem que contêm, senti uma alteração de humor”.

A monitorização da qualidade do ar requer a existência de técnicas que permitam a avaliação dos teores dos constituintes químicos presentes na atmosfera. Os métodos analíticos de medição de ozono atmosférico, conjuntamente com o CO_2 , encontram-se entre os primeiros a serem desenvolvidos para a avaliação de concentrações de gases vestigiais na atmosfera, em meados do Século XIX (Graedel e Crutzen, 1993). No que se refere ao O_3 , o princípio subjacente relacionava-se com a reacção rápida entre os compostos de iodo e de ozono, e a concentração de ozono determinava-se pela alteração de cor de um filtro de papel impregnado com um composto de iodo. Esta técnica aplicou-se em muitos locais no último quarto do Século XIX o que permitiu demonstrar que o ozono fazia parte dos constituintes da atmosfera superficial. Contudo, este método mostrou ser muito sensível à velocidade do vento e à humidade relativa o que torna vulnerável o estudo dos primeiros registos de medição de ozono.

A única série de dados de ozono validada entre os finais do Século XIX e princípios do Século XX é a do Observatório de Montsouris, perto de Paris. Os valores desta série foram comparados com os dados de concentração de ozono adquiridos entre 1956 e 1982, em Arkona, na Alemanha, e estão representados na Figura 4.3. Nesta, é possível verificar um aumento de três a quatro vezes da concentração média entre o período incluído na primeira série temporal e o da segunda série.

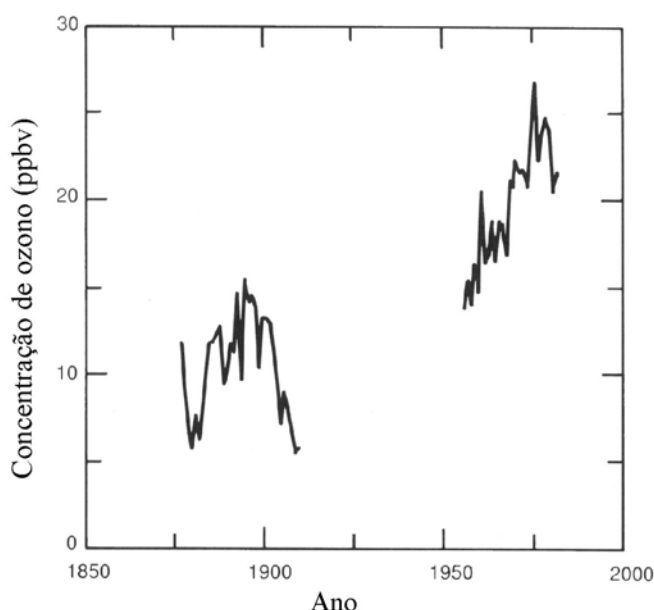


Figura 4.3: Comparação de concentração de ozono à superfície entre 1876-1907, em Montsouris, com medições em Arkona (costa do Mar Báltico da antiga República Democrática Alemã, entre 1956-1982), Graedel e Crutzen, 1993.

O reconhecimento do transporte de poluentes atmosféricos a longas distâncias e os seus efeitos adversos nos locais onde se depositam levaram à assinatura da Convenção de 1979 sobre Poluição Atmosférica a Longa Distância, e que hoje é composta por oito protocolos.

O Protocolo do Programa Comum de Vigilância Contínua e de Avaliação do Transporte a Longas Distâncias dos Poluentes Atmosféricos na Europa (protocolo EMEP) é um deles, ao qual Portugal aderiu em 1988 (Decreto do Governo n.º 5/88, de 9 de Abril). No âmbito deste protocolo e da legislação nacional relativa à qualidade do ar em vigor na altura (DL n.º 255/80 de 30 de Julho e Despacho Normativo n.º 29/87) surgiram as medições regulares da qualidade do ar havendo históricos de ozono desde 1989 nas estações do Século (zona urbana de Lisboa) e Monte Velho (Sines). Existe ainda uma série de cinco anos de medidas de ozono em superfície em Lisboa, entre 1971 e 1975 (Barros, 1999) que não se encontra enquadrada em qualquer diploma legal. Hoje em dia, a poluição pelo ozono troposférico está regulamentada pela Directiva Comunitária 2002/3/CE, transposta para o direito nacional pelo Decreto-Lei n.º 320/2003 de 20 de Dezembro, tendo como base os estudos da Organização Mundial de Saúde no que se refere aos efeitos das concentrações de ozono no ar ambiente na saúde humana.

A existência de séries temporais de poluentes atmosféricos permite controlar a evolução das suas concentrações ao longo do tempo, caracterizar estações consoante a sua localização, determinar padrões interanuais, sazonais, diários e intradiários.

O facto de Los Angeles ter sido pioneira na implementação de programas de gestão da qualidade do ar torna-a numa das regiões com maiores históricos de medições horárias de ozono e seus precursores. Nesta cidade, verificou-se uma tendência negativa na evolução da concentração de O₃, NO_x, COVNM e CO entre os anos de 1968 e 1985 (Graedel e Crutzen, 1993).

Tal como referido no Capítulo 2, são muitos os processos envolvidos na formação e destino dos compostos químicos presentes na atmosfera. No que se refere ao ozono, o ciclo anual das suas concentrações em superfície é controlado por diferentes factores, tais como: proximidade a grandes fontes de precursores de ozono, sejam elas difusas ou pontuais, localização geográfica e factores meteorológicos (Vingarzan e Taylor, 2003).

As medições de concentrações de ozono em todo o mundo revelam que estas apresentam um ciclo anual pronunciado que pode ter diferentes formas consoante a latitude e a altitude das estações em que são observadas. Monks (2000) evidenciou estas diferenças ao contrastar os ciclos anuais de ozono em camada limite marinha remota, pobre em NO_x, cujos máximos de ozono ocorrem no Inverno e os mínimos na Primavera, com os ciclos anuais de atmosfera de fundo continentais onde o máximo de ozono se regista na Primavera. Por outro lado, em zonas urbanas o máximo das concentrações de ozono acontece no Verão não se apresentando em forma de pico perfeitamente identificado, existindo uma janela temporal alargada com concentrações elevadas.

Nos últimos anos têm surgido diferentes estudos na avaliação de séries longas de concentrações de ozono superficiais. Lee *et al.*, 2003 apresentam tendências que assentam em séries com 37 anos, de nove localizações em São Bernardino, no Sul da Califórnia, onde se verificou um aumento da tendência das concentrações de ozono entre 1963 e 1979 seguido de uma diminuição devido à redução das emissões de NO_x e compostos orgânicos voláteis reactivos. Vingarzan e Taylor (2003), no Canadá, mostraram como o comportamento das séries de ozono variam de acordo com a sua proximidade às fontes de

precursores de ozono, notando-se um aumento das tendências de ozono em estações de qualidade do ar expostas às massas de ar oriundas do Oceano Pacífico, enquanto que as estações mais continentais apresentam uma tendência ligeira negativa no que se refere às séries anuais de ozono. Quando analisaram apenas o período de Verão, estas tendências apresentaram um decréscimo no total das estações de qualidade do ar analisadas, relacionadas com as medidas de redução de emissões de precursores de ozono troposférico. Estes resultados dão uma indicação do aumento das concentrações de fundo de ozono sobre a América do Norte.

Chen *et al.*, 2004 na avaliação feita às tendências de ozono na rede de monitorização sobre a Ilha Formosa chegaram também à conclusão que as médias horárias de ozono têm vindo a aumentar entre 1994 e o ano 2001 sobre esta região do continente Asiático. Este facto é válido também sobre o Japão (UE, 2003).

Segundo Wolf *et al.* (2001), as tendências de concentrações de ozono e seus precursores podem ser usadas como uma medida da eficiência dos programas de gestão da qualidade do ar. Neste sentido, compilaram e apresentaram os resultados de vários trabalhos realizados neste âmbito nos Estados Unidos e Canadá. Concluíram que entre 1985 e 1996 as tendências de ozono haviam diminuído nos EUA, enquanto que no Canadá a maior parte das estações de qualidade do ar em zonas urbanas apresentam tanto tendências positivas como negativas, sendo que a maior parte delas apresenta tendências positivas de crescimento da média dos máximos horários de concentração de ozono entre 1980 e 1993, o que não acontece noutras zonas deste país onde a tendência é negativa, ou pura e simplesmente não apresentam qualquer tendência.

Os estudos referidos e outros compilados em Brasseur *et al.* (2003) e UE (2003) indiciam um aumento das concentrações de fundo de ozono no Hemisfério Norte, não sendo claro qual a sua origem. Alguns autores sugerem causas naturais enquanto outros sugerem a contribuição de uma componente antropogénica associada ao transporte intercontinental de poluentes atmosféricos.

No que se refere à situação sobre a Europa (Europa dos 15, países que aderiram à União Europeia em 2004 e ainda à Islândia, Noruega, Suíça e Liechtenstein), as tendências nas concentrações de ozono em superfície mostram ser bastante complexas (EEA, 2004). As médias anuais, de todos os tipos de estações, aumentaram cerca de 8 % desde 1996 (Figura 4.4). O mesmo já não se verifica quando se analisam os máximos horários, ou os percentis elevados, das concentrações horárias de ozono, os quais apresentam uma tendência negativa em toda a década (Figura 4.5), em seis países do Norte e Centro da Europa.

Estudos de modelação parecem demonstrar a existência de uma relação estrita entre a diminuição de emissões de precursores e a diminuição das concentrações máximas horárias de ozono. Por outro lado, as explicações para o aumento da tendência de longo termo das concentrações anuais de ozono residem na diminuição da remoção química do ozono atmosférico pelo NO, devido à diminuição das emissões de NO_x, a baixa sensibilidade da produção fotoquímica de ozono a variações moderadas nas reduções de emissões de precursores e por um aumento das concentrações de fundo do ozono no Hemisfério Norte.

Esta tendência, como se observou, foi também detectada no Canadá por Vingarzan e Taylor (2003).

Resultados mais recentes de tendência de concentração e emissão de poluentes atmosféricos nos Estados Unidos da América em áreas metropolitanas reflectem a diminuição das tendências dos máximos de concentrações de médias de oito horas entre 1980 e 2003. A avaliação feita no período entre 1990 e 2003 mostra reduções menos expressivas, de 21 % no primeiro período de análise para 9 % no segundo período (EPA, 2004). As diminuições das concentrações de ozono registadas ao longo dos anos parece estar relacionada com os programas de redução de emissões impostos neste país.

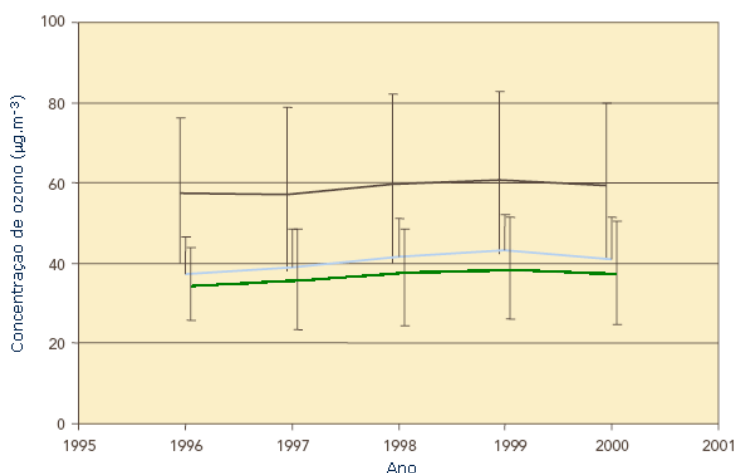


Figura 4.4: Médias anuais de ozono em estações de qualidade do ar rurais-linha preta, urbanas-linha azul e de artérias principais- linha verde (EEA, 2004).

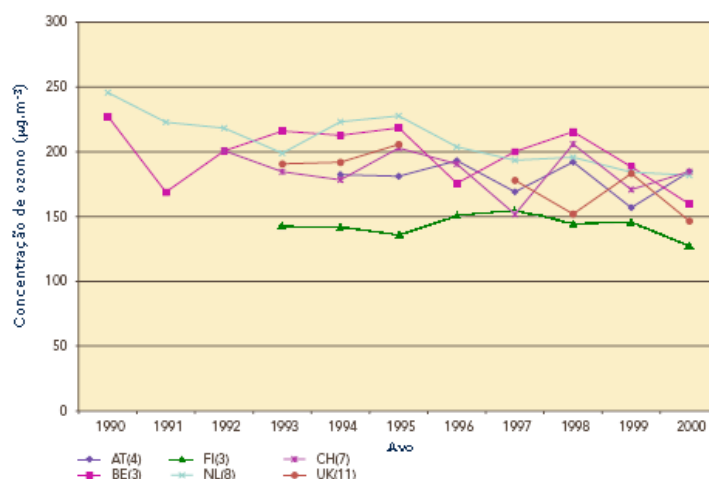


Figura 4.5: Máximos de concentrações de ozono horárias, em estações rurais (onde AT=Austria, BE=Bélgica, FI=Finlândia, NL=Holanda, CH=República Checa e UK= Reino Unido) (EEA, 2004).

Contudo as variações nas concentrações de ozono não acompanham a redução significativa da emissão dos seus precursores e por conseguinte a diminuição das suas concentrações. A Figura 4.6 representa, para a Europa dos 15, a evolução das emissões dos gases precursores

de ozono, CO, COVM, CH₄ e NO_x e a tendência de redução das emissões de NO_x e COVM de modo a atingir os tectos de emissões impostos pela Directiva dos Tectos de Emissão (Directiva nº 2001/81/CE, de 23 de Outubro), em 2010. No que toca às concentrações de NO₂, estas mostram diminuições de 15 % nas médias anuais desde 1996 e um incremento da variabilidade interanual em 1997 (Figura 4.7).

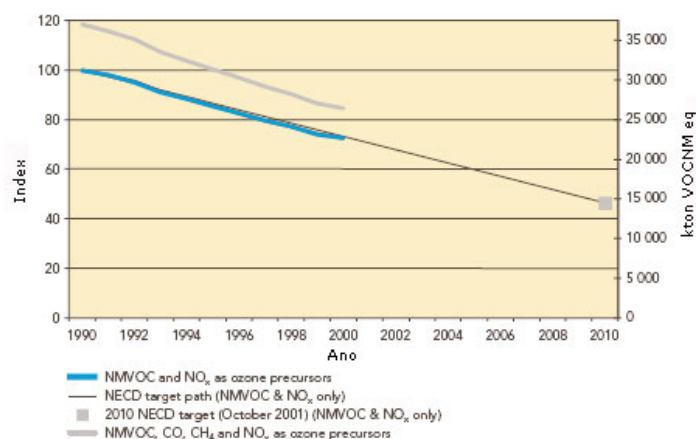


Figura 4.6: Emissão de gases precursores de O₃ entre 1990 e 2000 pela Europa dos 15 e tecto de emissão de COVM e NO_x em 2010 (EEA, 2004).

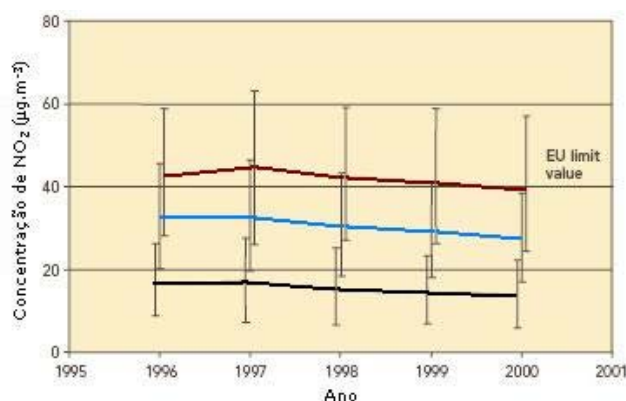


Figura 4.7: Médias anuais das concentrações horárias de NO₂ em estações de qualidade do ar rurais-linha preta, urbanas-linha azul e de artérias principais- linha vermelha (EEA, 2004).

Neste trabalho, pretendeu-se caracterizar as estações de qualidade do ar em Portugal em termos de ano médio e avaliar as tendências das concentrações de O₃, e dos seus precursores medidos na mesma rede, ou seja, os óxidos de azoto (NO, NO₂) e o monóxido de carbono (CO). Os COV não faziam, nem fazem, parte das medições regulares da rede de qualidade do ar em Portugal e por esta razão não há qualquer análise a este grupo de espécies químicas neste estudo. Procurou-se também a existência de uma relação entre a estabilidade da atmosfera, a pressão em superfície, e as concentrações de poluentes atmosféricos medidas junto ao solo. Para tal foi necessário reunir informação de longo termo e verificar quais das estações de qualidade do ar, pertencentes à Rede Nacional, poderiam ser consideradas neste estudo. A base de dados de qualidade do ar analisada contém informação, com frequência de aquisição horária, entre os anos de 1988 e 2003,

num total de 43 estações. Contudo, a disponibilidade e eficiência de aquisição das estações, com respeito aos poluentes acima referidos, limitaram as estações a considerar.

4.2 *Climatologia de variáveis meteorológicas e de qualidade do ar*

As concentrações de poluentes fotoquímicos reflectem a variedade de escalas temporais e espaciais que para elas contribuem. No que se refere à produção de ozono, para além do ciclo anual previamente descrito, é possível isolar as várias componentes que se sobrepõem numa série temporal de concentrações deste constituinte químico da atmosfera. Em termos espaciais, normalmente a concentração de O_3 é inferior em zonas urbanas, devido à presença de concentrações elevadas de NO_x que o consomem, aumentando à medida que se verifica o transporte dos seus precursores de azoto para as áreas rurais, e a incorporação de COV emitidos por estas.

No Capítulo 2 referiram-se os processos essenciais que afectam a formação e o destino dos compostos químicos na atmosfera de que são exemplo as emissões, a turbulência atmosférica e o transporte. Desta forma, o estado dinâmico e termodinâmico da atmosfera é muitas vezes determinante nos valores de concentração de poluentes gasosos registados. Assim, as observações de parâmetros atmosféricos constituem uma informação importante na compreensão do transporte e transformação dos poluentes na atmosfera, sobretudo na troposfera. As radiossondagens constituem um modo de medição desses parâmetros e têm por objectivo determinar o estado do ar em altitude num determinado instante. Os parâmetros adquiridos são, em geral, a temperatura, a pressão, a humidade e a velocidade do vento, os quais, em combinações específicas, resultam em índices cujos valores dão uma indicação da estabilidade atmosférica. Estes valores correlacionaram-se com parâmetros de qualidade do ar definidos para o respectivo dia definidos na secção 4.2.2).

Tabela 4.1: Estações de monitorização de qualidade do ar seleccionadas.

Rede de QualAr	NOME	SIGLA	TIPO	ZONA	Início
Norte	Ermesinde	ERM	Fundo	Suburbana	1-Jan-99
	Rua dos Bragas (FEUP)	FEU	Tráfego	Urbana	14-Fev-92
	Formosa	FOR	Tráfego	Urbana	1-Jan-94
Centro	Estarreja/Avanca	AVA	Fundo	Rural	1-Jan-85
	Coimbra/Avenida Fernão Magalhães	COI	Tráfego	Urbana	1-Mai-90
Lisboa e Vale do Tejo	Entrecampos	ENT	Tráfego	Urbana	1-Mar-92
	Hospital Velho	HVE	Tráfego	Urbana	1-Jan-88
Alentejo	Monte Chãos	MCH	Industrial	Suburbana	1-Jan-78
	Monte Velho	MVE	Fundo	Rural	1-Jan-76
	Santiago do Cacém	SCA	Industrial	Urbana	1-Jan-83

Tal como anteriormente referido, as estações de qualidade do ar foram validadas quanto à sua eficiência de medição de poluentes atmosféricos. Inicialmente consideraram-se as que apresentassem eficiência superior a 75 % por ano. Este critério mostrou ser extremamente restritivo o que levou a diminuí-lo para 50 %. Ainda assim, apenas 10 estações da rede foram seleccionadas (ver Tabela 4.1) tendo-se considerado ainda a estação do Pego, estação privada de carácter industrial, de forma a se poder obter alguma informação no interior do País.

4.2.1 Caracterização do padrão anual de poluentes fotoquímicos

Para cada um dos poluentes (CO , NO_x e O_3) tentou identificar-se o padrão anual médio associado a cada estação tendo-se calculado a concentração média de cada dia do ano a partir das séries consideradas válidas, em termos de eficiência de aquisição diária. Os valores dos dias médios e a variabilidade associada encontram-se representados nas Figuras 4.8 a 4.11.

Em termos de NO e NO_2 (Figura 4.8 e Figura 4.9), as concentrações mais baixas encontram-se na estação de fundo de Monte Velho, seguidas de todas as estações industriais analisadas (Monte Chãos, Santiago do Cacém e Pego). Na generalidade das estações verifica-se a existência de picos de concentrações médias no Outono/Inverno, exceptuando-se as estações da Rua Formosa e de Coimbra cujo comportamento assinala diminuições de concentrações de NO_2 nestas estações do ano. Os valores mais elevados de concentração nas estações do ano mais frias estão associados a um aumento da variabilidade dos valores de NO medidos. Tal não se verifica em relação à variabilidade associadas às medições de NO_2 , que se apresenta em geral elevada. Em alguns locais, nomeadamente na Faculdade de Engenharia, no Porto, e na estação do Pego, verificam-se mínimos relativos de NO_2 na Primavera que suavemente incrementam os seus valores.

No que se refere ao monóxido de carbono (Figura 4.10), este apenas se analisa em estações de tráfego nas quais apresenta claramente uma diminuição das suas concentrações no Verão, começando a decrescer em Fevereiro/Março. Este facto faz notar um consumo deste poluente no Verão, eventualmente por via fotoquímica, já que mostra uma concavidade simétrica em relação às concentrações de ozono nas mesmas estações.

Na maioria das estações de fundo registam-se valores de O_3 superiores aos observados nas de tráfego. As estações de carácter industrial atingem valores médios tão elevados como as de fundo, contudo parece haver algumas diferenças geográficas. As estações mais a Sul, Santiago do Cacém e Monte Chãos mostram pequenas oscilações nas concentrações elevadas de ozono com valores ligeiramente mais elevados no Verão, enquanto que a estação do Pego apresenta um aumento das concentrações bem definida primeiro na Primavera e seguidamente no Verão, como se se tratasse de uma estação de fundo. Tal poderá dever-se ao facto de as primeiras serem consideradas estações industriais urbana e suburbana, respectivamente.

Nas estações de tráfego, as concentrações de NO_x , tal como se verifica nas concentrações médias de CO , apresentam uma evolução inversa em relação à do ozono. Quando a

concentração de NO_x (ou de CO) aumenta, a de O_3 diminui, e vice-versa. Esta constatação verifica novamente o ciclo sazonal de formação de O_3 em que no período de Primavera/Verão o aumento de radiação solar favorece a produção deste oxidante, através do consumo de NO_x . Contrariamente, no Outono/Inverno as estações de tráfego mostram um aumento de concentrações médias de NO_2 , revelando a acumulação desta espécie química na camada limite.

Poluente: NO

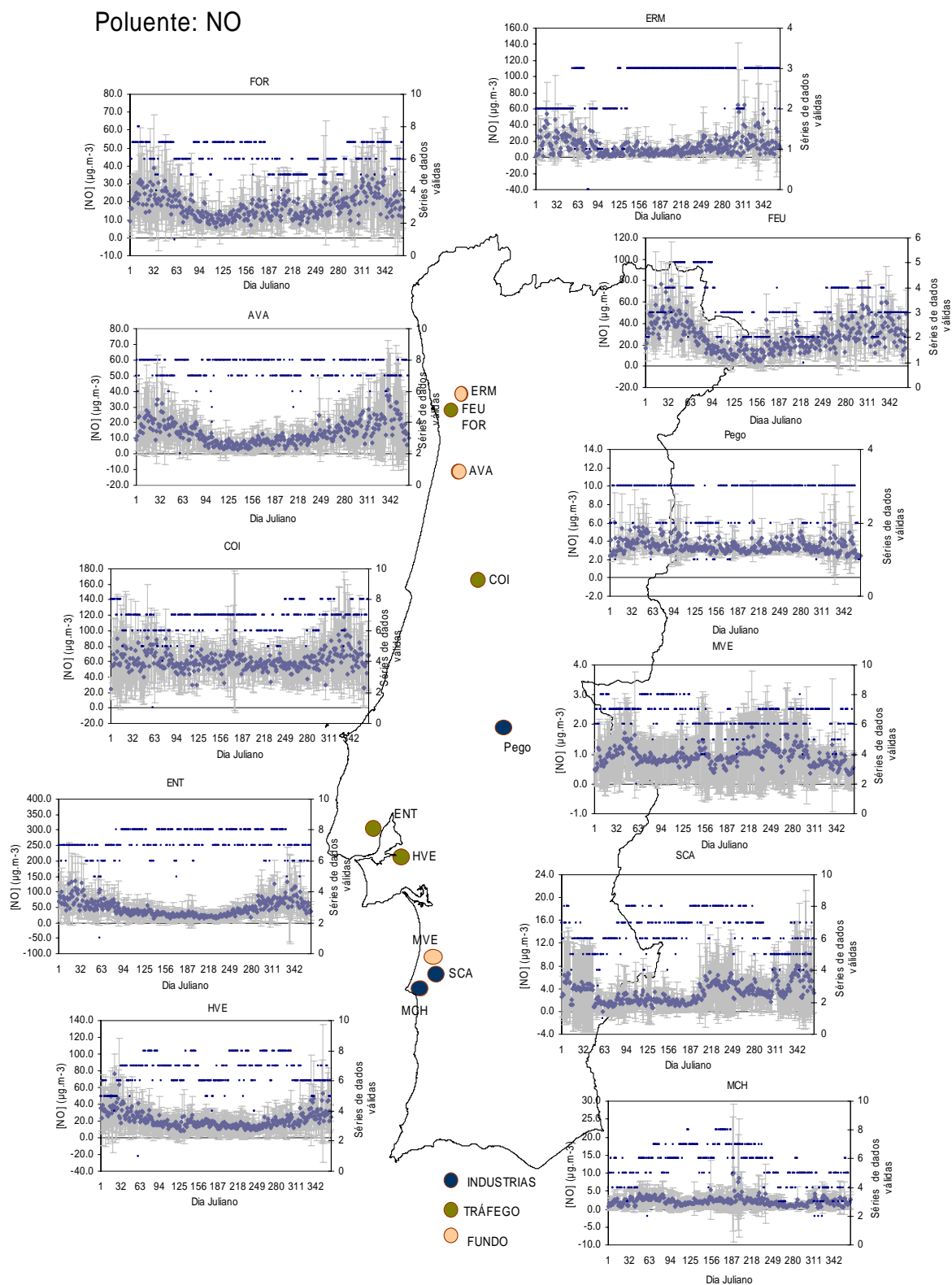


Figura 4.8: Média e desvio padrão de concentração de NO para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.

Poluente: NO_2

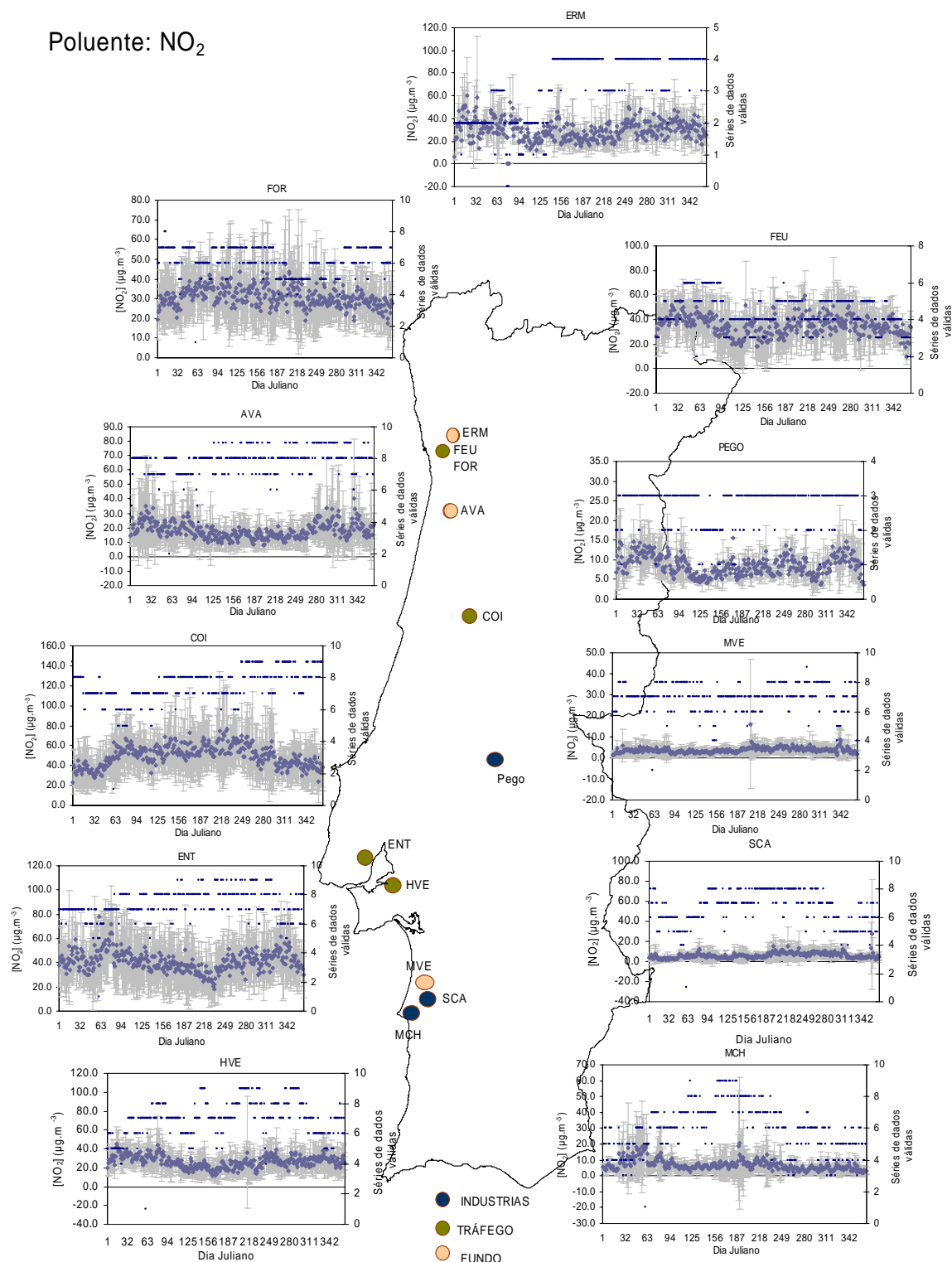


Figura 4.9: Média e desvio padrão de concentração de NO_2 para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.

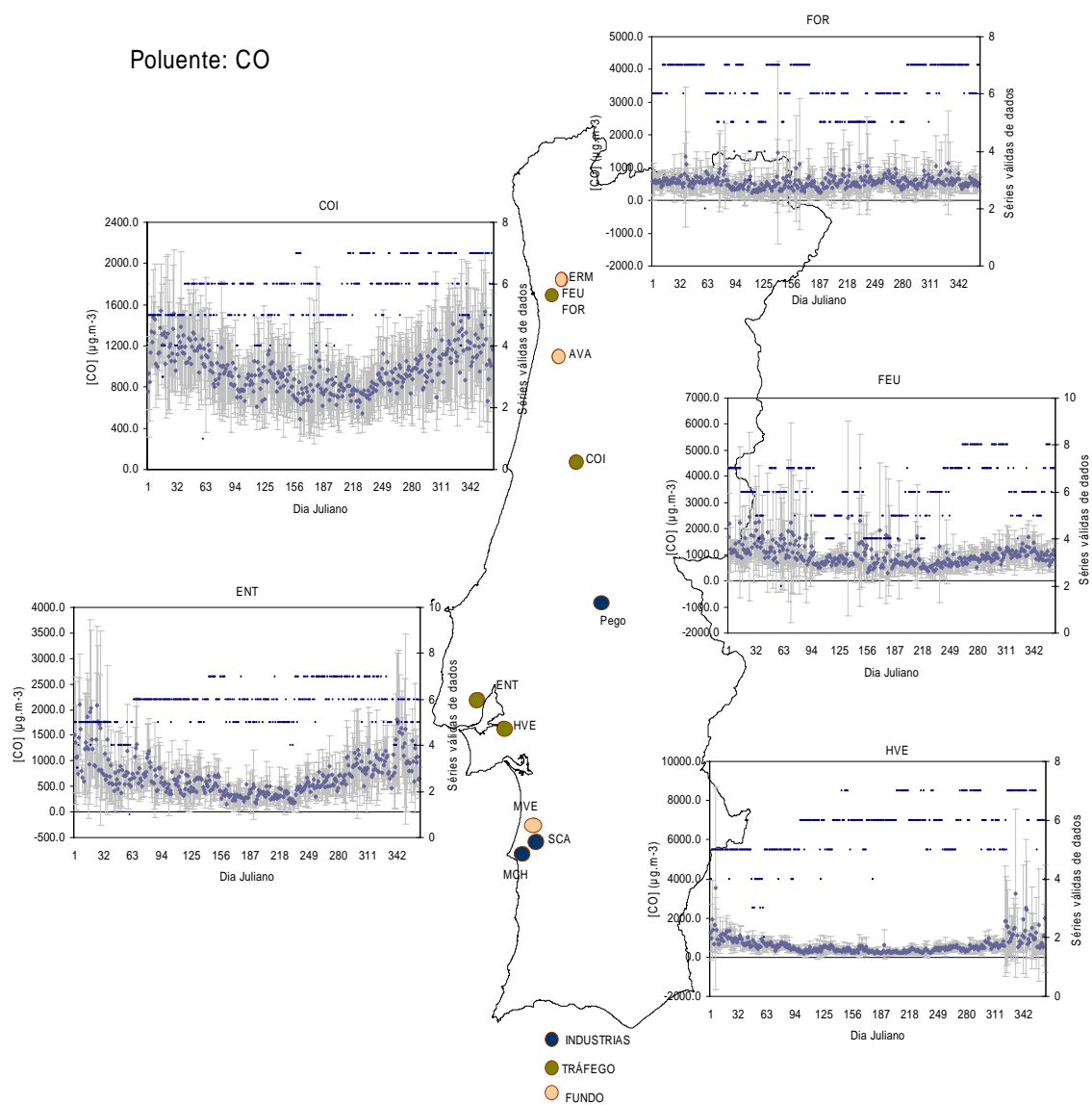


Figura 4.10: Média e desvio padrão de concentração de CO para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.

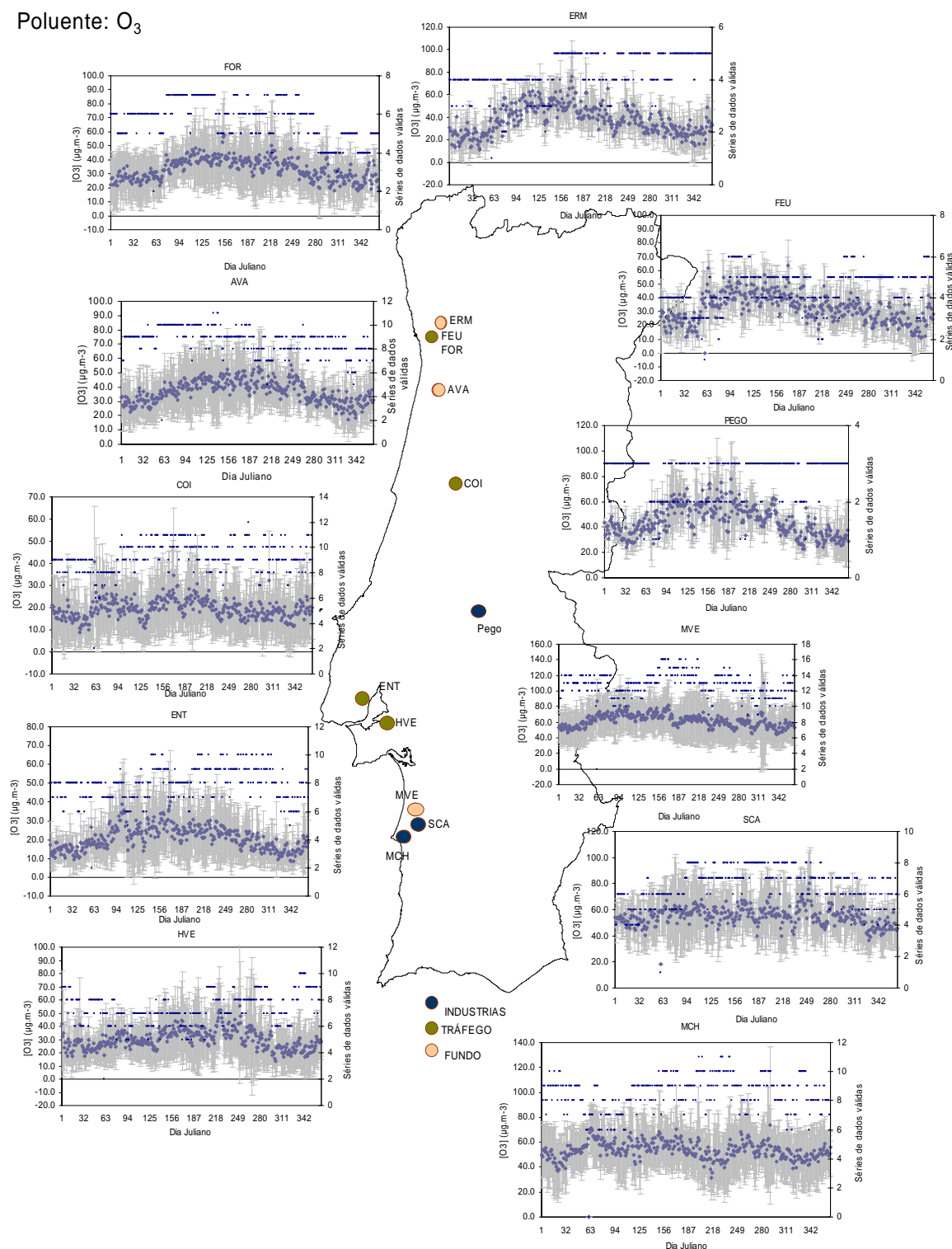
Poluente: O₃

Figura 4.11: Média e desvio padrão de concentração de O₃ para cada dia Juliano (eixo da esquerda), e respectivo número de séries válidas para o seu cálculo (a azul escuro, eixo da direita), em cada estação analisada.

4.2.2 Correlação entre parâmetros de qualidade do ar e de estabilidade atmosférica

Os parâmetros de estabilidade da atmosfera considerados nesta análise devem fornecer uma informação da atmosfera em geral, e não na camada limite, para que a relação entre os seus valores e de qualidade do ar seja também possível em áreas afastadas do local de lançamento da radiossondagem, Lisboa/Gago Coutinho. Tradicionalmente, as radiossondagens são realizadas através de balões meteorológicos que enviam as observações via rádio para a estação receptora e, segundo a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), são consideradas representativas duma área com um raio entre 200 km a 300 km do ponto de observação (Stull, 1994). A Figura 4.12 tem representados dois círculos de raios 200 e 300 km, centrados em Lisboa, observa-se que as regiões centro e Sul do país se encontram dentro do circunferência de menor raio, enquanto que apenas os 4 distritos mais setentrionais se excluem da circunferência de raio de 300 km, ou seja, os distritos de Viana do Castelo, Braga, Vila Real e Bragança.

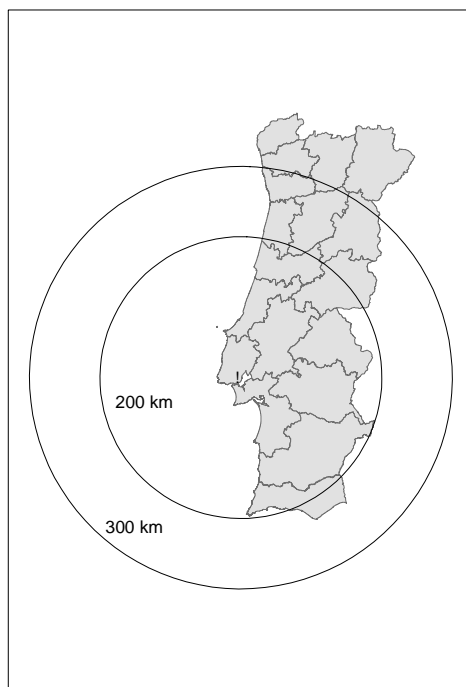


Figura 4.12: Área de Portugal coberta pelas circunferências de raios 200 e 300 km centradas em Lisboa.

Seleccionaram-se apenas as radiossondagens realizadas às 12H00 UTC pelo facto de ser a hora em que há o maior número de observações. O período de análise encontra-se entre os anos 1990 e 2003, havendo falhas consideráveis entre os anos de 1994 e 1998. Seleccionaram-se os seguintes parâmetros de estabilidade: *Convective Available Potential Energy* (CAPE), Número de Richardson de *Bulk* (BRCH), o “*K-Index*” (KI), o *Lifted-Index* (LI), e o *Showalter Index* (SWI). Estes parâmetros baseiam-se em diferenças de temperatura e de humidade, a diferentes níveis de pressão, e na extensão de camada húmida. Alguns deles calculam-se duplamente consoante a variável de temperatura

seleccionada, temperatura ou temperatura virtual. Estes índices classificam-se numa gama de valores bem definida, à qual é atribuída um estado de estabilidade (URL 13 e URL 14, ver Anexo I para uma descrição dos índices).

A Tabela 4.2 pretende relacionar os possíveis valores assumidos pelos índices e o correspondente estado de estabilidade da atmosfera. O aumento do valor dos índices que assumem apenas valores positivos, como é o caso do CAPE, BRCH e KI, está relacionado com uma diminuição da estabilidade na atmosfera. Por outro lado, os índices que permitem valores positivos e negativos, caso do LI e SWI, dão indicação de presença de estabilidade, no caso do valor ser positivo, e de instabilidade, no caso de ser negativo.

Tabela 4.2: Parâmetros de estabilidade atmosférica e seu significado físico (Leitão *et al.*, 2004).

Parâmetros de estabilidade	Significado Físico
CAPE – Convective Available Potential Energy	CAPE $\uparrow \Rightarrow$ Estabilidade \downarrow
BRCH – Número de Richardson <i>Bulk</i>	BRCH $\uparrow \Rightarrow$ Estabilidade \downarrow
KI – K-Index	KI $\uparrow \Rightarrow$ Intensidade tempestade \uparrow
SWI – Showalter Index	SWI $< 0 \Rightarrow$ Instabilidade
	SWI $> 0 \Rightarrow$ Estabilidade
LI – Lifted Index	LI $< 0 \Rightarrow$ Instabilidade
	LI $> 0 \Rightarrow$ Estabilidade

Obteve-se um conjunto de dados de estabilidade atmosférica para cada dia de observações aerológicas existente o qual se pretendeu correlacionar com a qualidade do ar medida nas estações consideradas neste estudo. Desta forma impôs-se a definição de parâmetros diários baseado nas concentrações horárias de poluentes fotoquímicos. Assim, e no que se refere à qualidade do ar, definiram-se seis variáveis, com base nos valores horários, que se considerou dar uma indicação da qualidade do ar sob vários aspectos:

- média diária dos valores horários;
- três médias octo-horárias, não móveis, denominadas
 - “octo a” entre as [00H00-08H00[horas;
 - “octo b” para o período compreendido entre as [08H00-16H00[horas
 - “octo c” para as últimas oito horas do dia, entre as [16-24[horas;
- média dos valores horários das 8 às 20 horas, de forma a caracterizar o período diurno, e os máximos diários.

Existem diversos tipos de correlações sendo as mais aplicadas as correlações de Pearson, também conhecidas por correlações lineares. Contudo, este método pode apresentar fraca robustez devido à sua incapacidade de reconhecer fortes correlações não lineares entre as

variáveis em causa; por outro lado, não é um método resistente pois mostra ser extremamente sensível a pares de valores muito superiores ou inferiores à média da respectiva série de dados em análise (Wilks, 1995). A correlação de Spearman surge como uma alternativa não paramétrica, robusta e resistente, à correlação de Pearson, sendo a mais indicada para dados ordinais. Assume-se que as variáveis em estudo foram medidas numa escala ordinal, podendo os dados ser ordenados em duas séries. Neste caso, os resultados obtidos são representativos de correlações fortes entre variáveis que não sejam exclusivamente lineares (Wilks, 1995). No presente capítulo descrevem-se apenas os resultados de correlações obtidas com ambos os métodos dado o volume de informação obtida (as correlações estatisticamente significativas obtidas podem ser consultadas no Anexo II). Em termos gerais, os melhores resultados de correlação entre as variáveis de qualidade do ar e os parâmetros de estabilidade são obtidos quando é aplicado o método de Spearman.

Foram detectadas algumas situações particulares resultantes desta análise e que se julga ser interessante explorar, nomeadamente a importância das falhas de dados nas séries, a eventual representatividade da localização da radiossondagem e a influência de condições meteorológicas extremas nos resultados das correlações.

Nas estações de Lisboa e Vale do Tejo seria de esperar a obtenção de fortes correlações entre os parâmetros de estabilidade e a variável “octo b”, visto este ser o período no qual é feita a radiossondagem utilizada para o estudo em causa. Tal facto não é frequente. No geral, as estações do Norte apresentam melhores correlações que as incluídas na região de Lisboa e Vale do Tejo.

Os resultados obtidos através das correlações entre os dados das estações FEU e FOR e os parâmetros de estabilidade constituem um exemplo de eventual influência das falhas existentes nas séries de concentrações de poluentes nos resultados finais. Esperar-se-ia que estas duas estações seguissem um comportamento semelhante, em termos das correlações, devido a serem ambas do tipo tráfego e influenciadas pelas mesmas características urbanas da cidade do Porto, mas tal não se verificou. Analisando os dados incluídos na determinação das correlações, foi possível notar que as falhas destes, em termos de qualidade do ar (porque os parâmetros de estabilidade se mantêm entre estações), são diferentes para cada estação, tornando difícil qualquer comparação entre elas.

Existem certos fenómenos meteorológicos que influenciam de forma acentuada as concentrações de poluentes medidas à superfície e os resultados obtidos em termos de correlações. Poderia supor-se a existência desses fenómenos aquando da análise dos parâmetros de estabilidade calculados, sendo um exemplo os valores elevados de KI nos últimos meses de 2000 e início de 2001, em que, segundo este, haveria tempestades com chuvas fortes. Este facto foi corroborado com as informações do Instituto de Meteorologia nas quais se observa que a quantidade de precipitação anual (Setembro de 2000 a Agosto de 2001) foi superior aos valores das normais 1961-90 em todo o território continental, sendo os meses que mais contribuíram para a quantidade de precipitação anual os de Dezembro, Janeiro e Março (URL 15). Assim, qualquer registo de concentração medida

neste período, foi afectado por esta ocorrência, especialmente para poluentes que sofram dissolução, como é o caso do NO_x .

Outro exemplo da importância das falhas de dados nos resultados de correlações é mostrado pelas correlações do O_3 medido nas estações FEU e FOR, no ano de 2001, em que no mês de Janeiro apenas existem medições em FEU e, neste mesmo mês, é nesta estação que se observam as melhores correlações. Este caso confirma as fortes correlações de O_3 com situações de instabilidade, ou seja, uma estação que não apresente registos neste ano, como é o caso da FOR, os valores de correlação que indicam uma melhor relação com instabilidade atmosférica, seriam baixos.

De uma forma geral, as concentrações de NO , NO_2 e O_3 apresentam correlações mais significativas durante o Inverno em todas as estações analisadas, enquanto que para o CO elas ocorrem no Verão. Na Tabela 4.3 encontram-se, de forma resumida, os principais resultados obtidos para as correlações entre os parâmetros de estabilidade e os de qualidade do ar para todos os poluentes estudados.

Tabela 4.3: Resumo dos resultados de correlações entre a estabilidade atmosférica e a qualidade do ar.

Poluente	Correlações
NO	Melhores correlações durante o Inverno; Correlações negativas com KI e positivas com SWI, Li e LIV
NO_2	Melhores correlações durante o Inverno e durante o período nocturno; Correlações negativas com KI e positivas com SWI, Li e LIV
O_3	Melhores correlações durante o Outono e Inverno; Correlações negativas com “Psup” e positivas com CAPE, CAPEV, BRCH, BRCHV
CO	Melhores correlações durante o Verão Meses de Janeiro/Fevereiro/Novembro/Dezembro correlações negativas com CAPE, CAPEV, BRCH e BRCHV e positivas com os restantes Meses de Abril a Agosto, comportamento oposto Correlações positivas com “Psup” no Inverno e negativa na Primavera e Verão

Para o **NO**, a análise das correlações obtidas permite a identificação de correlações negativas com o KI, opostas às conseguidas com SWI, LI e LIV, mas que têm o mesmo significado físico, ou seja, a concentração de NO tende a aumentar em condições de estabilidade troposférica. Sendo anticorrelacional com KI, indica que quantas mais tempestades com precipitação forte houver, menor será a sua concentração à superfície, facto que pode ser explicado devido à dissolução deste composto e ao seu transporte para a alta troposfera por estas mesmas tempestades (Seinfeld, 1998). Quanto à relação com a pressão superficial (“Psup”) não é possível qualquer conclusão por falta de significância estatística, contudo o NO apresenta preferencialmente correlações positivas com a pressão superficial.

O **NO₂** apresenta um comportamento semelhante ao verificado para o NO. A grande diferença está no período do dia (traduzido pelas diferentes variáveis indicadoras da qualidade do ar) para o qual se obtêm melhores valores de correlação. Para este poluente o período nocturno é o que mais bem se correlaciona com os parâmetros em questão. A razão pela qual as concentrações de NO₂ são mais elevadas neste período dever-se-á ao consumo de O₃ pelo NO resultando na formação de NO₂. A relação dos NO_x com condições de atmosfera estável no Inverno está, em parte, ligada às condições meteorológicas verificadas nesta altura do ano. No Inverno, a ocorrência de sistemas anticiclónicos é comum, sendo estes bem marcados: a altura da camada limite é menor que a verificada por norma no Verão, e, como tal, havendo menos diluição na atmosfera, os poluentes acabam por ficar concentrados à superfície. Aliado a este facto, a concentração de NO_x registada aumenta porque, no Inverno, o consumo destes compostos por fotoquímica não é favorecido por haver menos radiação solar que promova as reacções químicas.

Relativamente ao **O₃**, os resultados obtidos mostram correlações significativas no Outono e Inverno indicando que o aumento da concentração deste poluente à superfície está relacionado com condições de instabilidade, neste período. Estas podem ter origem em sistemas sinópticos frontais que favorecem a mistura vertical da atmosfera, fora da camada limite (Brasseur *et al.*, 2003). Esta mistura, conjugada com a tropopausa situada a um nível vertical mais baixo nesta estação do ano, pode permitir a criação de condições propícias a intrusões de O₃ estratosférico, que podem assim justificar o aumento da presença deste composto à superfície, pois a produção fotoquímica de O₃ não é elevada no Inverno. Para além deste facto, as concentrações de O₃ correlacionam-se negativamente com a “Psup”, o que permite relacionar a instabilidade verificada a sistemas frontais associados a sistemas de baixas pressões.

No caso do **CO**, as melhores correlações são obtidas com a “Psup”, no Verão, que por serem negativas indicam que quanto mais baixa for a pressão, mais elevada será a concentração. Esta ocorrência poderá estar ligada a situações de clima seco, onde a predominância do radical OH• é reduzida e, como tal, não existe grande consumo de CO. Por outro lado, as concentrações deste poluente correlacionam-se positivamente com parâmetros que indicam estabilidade, SWI, LI e LIV. Neste caso, os padrões sinópticos que poderão estar relacionados com estas correlações são diferentes do anteriormente analisado para o O₃.

Durante o Verão, Portugal sofre alternadamente a influência do Anticiclone dos Açores e de uma baixa térmica. Barry e Chorley (1998) definem a baixa pressão de origem térmica pela presença de baixas pressões em superfície e de uma crista anticiclónica em altitude e registam a sua ocorrência também sobre a Península Ibérica. Recentemente, Hoinka e Castro (2003) analisaram a ocorrência deste padrão, especificamente sobre a Península Ibérica, a partir dos dados ERA-15 do Centro Europeu de Previsão de Médio e Longo Prazo. Estes autores definem a baixa térmica como uma depressão não frontal, quente, de fraca expressão vertical, que se forma sobre regiões continentais, sobretudo em regiões subtropicais mas também é possível observá-las às latitudes médias. As áreas de maior ocorrência deste fenómeno caracterizam-se por ser áridas ou semi-áridas, onde a evaporação é fraca e podem persistir sobre a região de formação de forma quasi-estacionária. Segundo estes autores, 45,5 % e 45,2 % dos dias de Julho e Agosto, respectivamente, apresentam este padrão, sendo seguidos pelos meses de Junho e Setembro com, 13,9 % e 18,0 % de dias com baixa térmica, respectivamente. Este sistema apresenta estrutura horizontal e vertical características. Nos dias de baixa térmica, o gradiente de pressão ao nível médio das águas do mar é mais intenso na parte Oeste e Norte da Península Ibérica. Em termos verticais, detectaram duas camadas, uma de convergência perto da superfície, que se pode estender até aos 1500 de altitude, e outra de divergência com penetração possível até aos 5000 m de altitude. Todavia, estas camadas apresentam diferenças no seu posicionamento, a Oeste da Península Ibérica a camada de convergência é menos profunda e a camada divergente atinge a superfície perto da Costa Atlântica, o que não acontece na parte Este da Península onde permanece elevada a todas as horas do dia.

Os resultados menos bons obtidos para as correlações durante o período de Verão para Portugal poderão estar relacionados com o facto de as situações que levam à formação de poluentes fotoquímicos sobre o nosso país não serem sistemas meteorológicos bem definidos, como é o caso, por exemplo, da Alemanha onde os episódios de ozono estão muitas vezes associados a situações anticiclónicas (EEA, 1998). Contudo, a metodologia aplicada no presente trabalho explica alguma da variação de concentração de ozono em superfície em situações de grande instabilidade, normalmente associadas à passagem de sistemas frontais sobre o país. Durante o Outono/Inverno estes sistemas são em geral bem marcados. Esta constatação e o conhecimento da existência de episódios de ozono em superfície durante o Inverno, muitas vezes de madrugada, em geral registados durante a passagem de sistemas frontais (Barros, 1999), conduziu ao estudo dinâmico das situações meteorológicas verificadas (ver Capítulo 5).

4.3 Tendências de ozono e seus precursores em Portugal

Analisaram-se as evoluções das médias anuais e das médias dos máximos diários de ozono e seus precursores. No que se refere a estes últimos, verificou-se uma diminuição das concentrações de CO em quatro estações de tráfego, duas na área metropolitana de Lisboa (ENT e HVE), uma em Coimbra, e outra na área metropolitana do Porto (Figura 4.13).

Poluente: CO

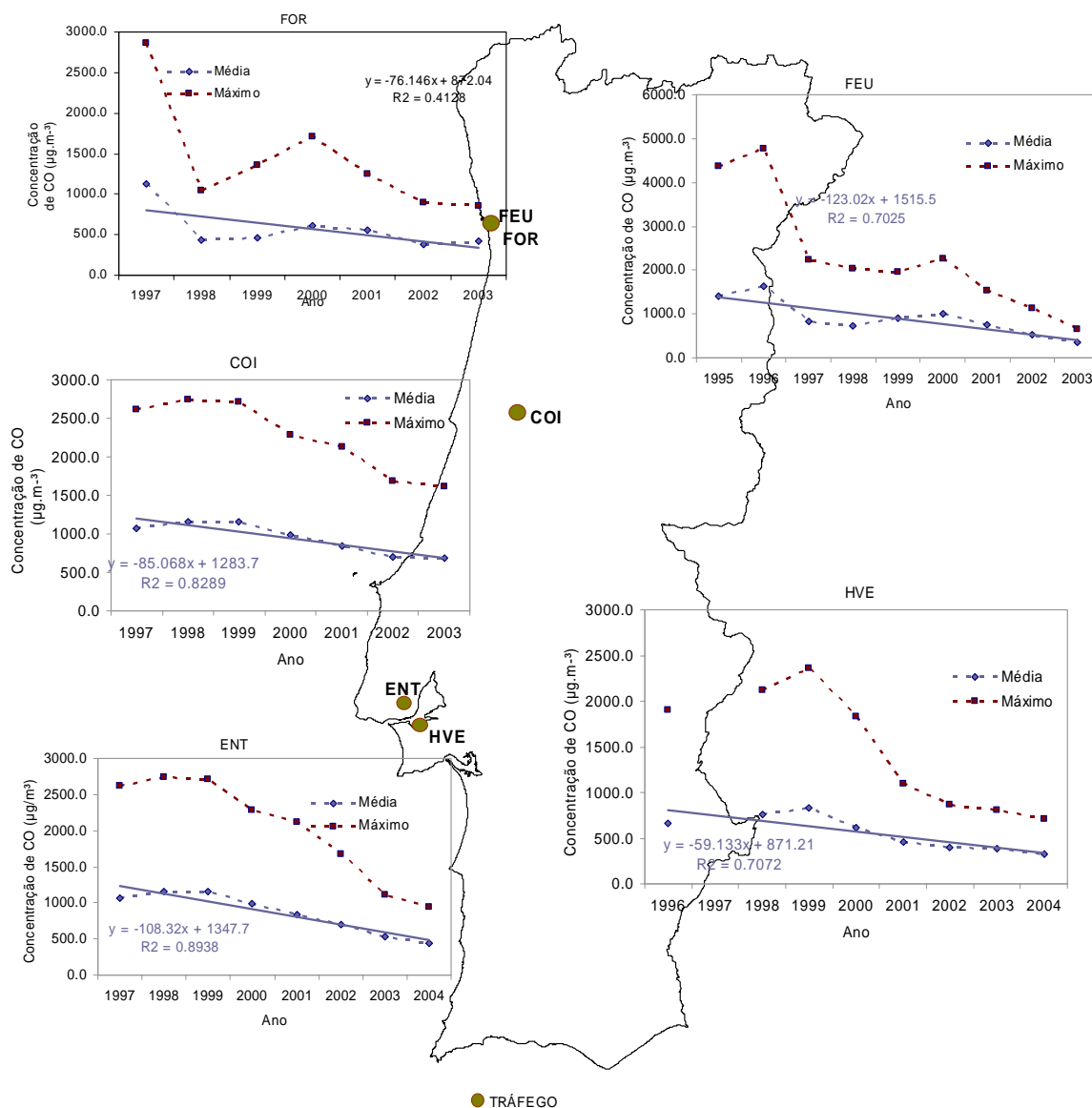


Figura 4.13: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelho) de CO.

Os coeficientes de correlação associados às rectas de regressão são superiores a 0,7, e as maiores taxas de decréscimo estão associadas às estações da Rua dos Bragas, no Porto, e de Entrecampos, em Lisboa. As médias anuais dos máximos diários apresentam descidas significativas em todas as estações de tráfego, sobretudo a partir de 1999. A estação da Rua dos Bragas, no Porto é aquela que apresenta maiores descidas das médias anuais de máximos. No ano de 2003, Coimbra apresentou valores de médias anuais dos máximos diários bem acima dos $1000 \mu\text{g.m}^{-3}$, enquanto que em Entrecampos se excedeu esse valor em cerca de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$. A redução de valores limite de emissão deste poluente por

motores de automóveis, imposta pelo DL n° 202/2000, de 1 Setembro, parece reflectir-se na crescente diminuição das concentrações do CO.

O tipo de estações nas quais se estudaram as tendências das médias anuais das concentrações de NO e NO₂ é variado (Figura 4.14 e Figura 4.15). Contudo, a classificação das estações não parece ser determinante nas tendências verificadas. Há estações que apresentam tendências positivas e outras negativas. O mesmo se passa se se fizer uma análise com base nas Redes de Qualidade do ar. É conveniente frisar que os coeficientes de correlação, neste caso, são extremamente baixos. A estação que apresenta maiores valores de correlação é a de Monte Velho, na qual se verifica um aumento da taxa de crescimento das concentrações de ambos os precursores de ozono no tempo, o que pode estar relacionado com o aumento de emissões próximas desta estação de monitorização, ou de transporte, uma vez que os valores de concentrações aqui registados são os mais baixos de todas as estações presentes neste estudo. A rede de qualidade do ar do Alentejo é aquela que apresenta os menores valores de médias anuais, no que refere ao NO e ao NO₂.

O DL n° 111/2002 estipula o valor limite anual de 40 µg.m⁻³ das concentrações de NO₂ visando a protecção humana. Este valor foi apenas ultrapassado em Coimbra (Avenida Fernão Magalhães), Rua dos Bragas e Entrecampos. As duas primeiras estações apresentam diminuições das concentrações enquanto que Entrecampos mostrou médias anuais superiores a este valor nos últimos 3 anos.

O método dos mínimos quadrados foi também aplicado às concentrações de ozono. Apenas a estação de Monte velho mostra uma taxa negativa na evolução das concentrações de ozono no tempo, contudo o coeficiente de correlação associado é extremamente baixo. Tal verifica-se em quase todas as outras estações analisadas. As tendências crescentes das concentrações médias anuais de ozono mais significativas estão associadas às estações de Entrecampos, Coimbra e Avanca. Em termos das médias anuais das concentrações máximas de ozono, Entrecampos mostra uma subida dos valores acentuada desde 1996 até 2004, enquanto que as restantes estações mostram oscilações nos valores deste parâmetro. É interessante notar que existem picos individualizados nas médias das concentrações máximas de ozono em 1996, Coimbra e Monte Velho, e em 1997, em Santiago do Cacém e Monte Chãos.

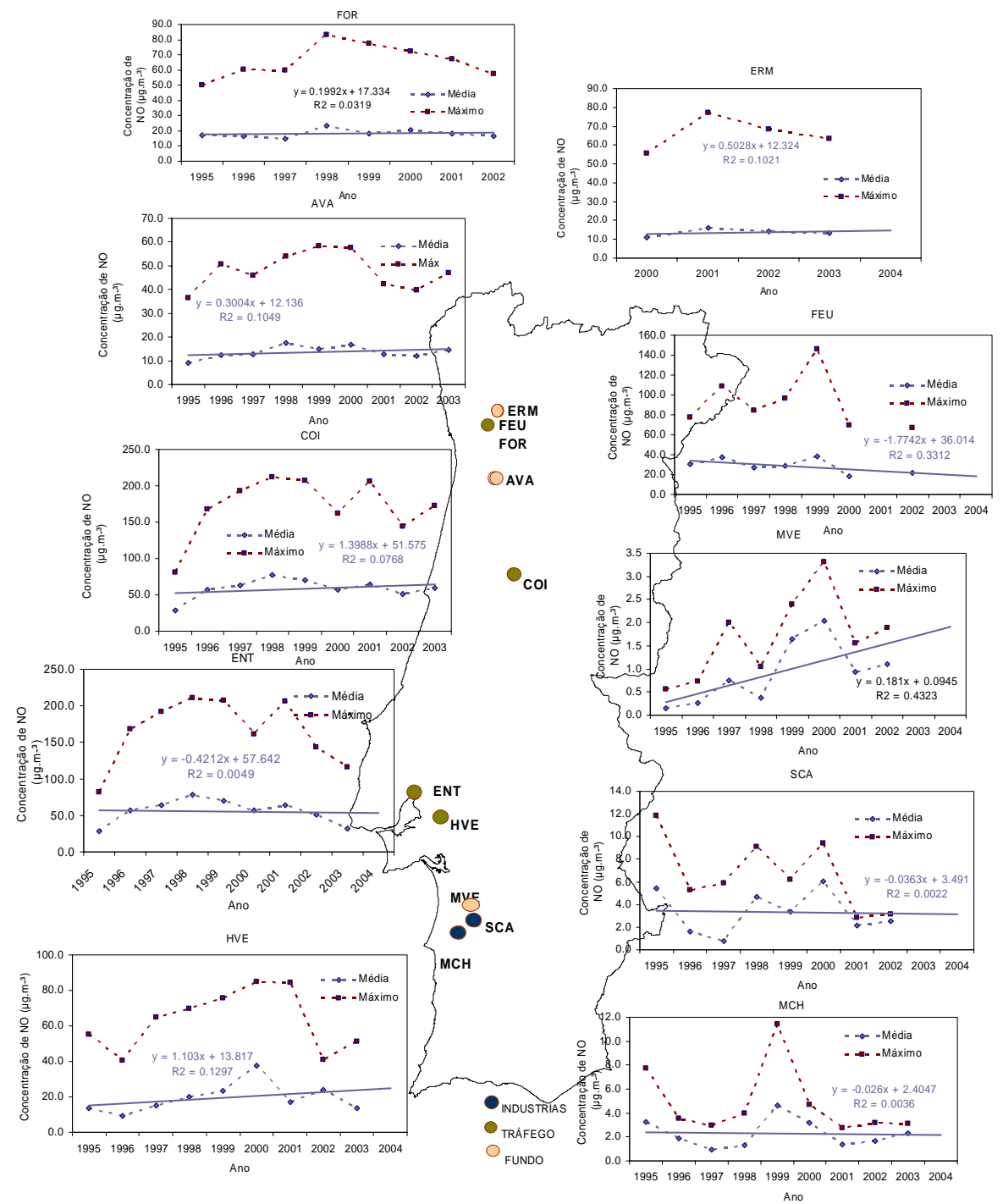
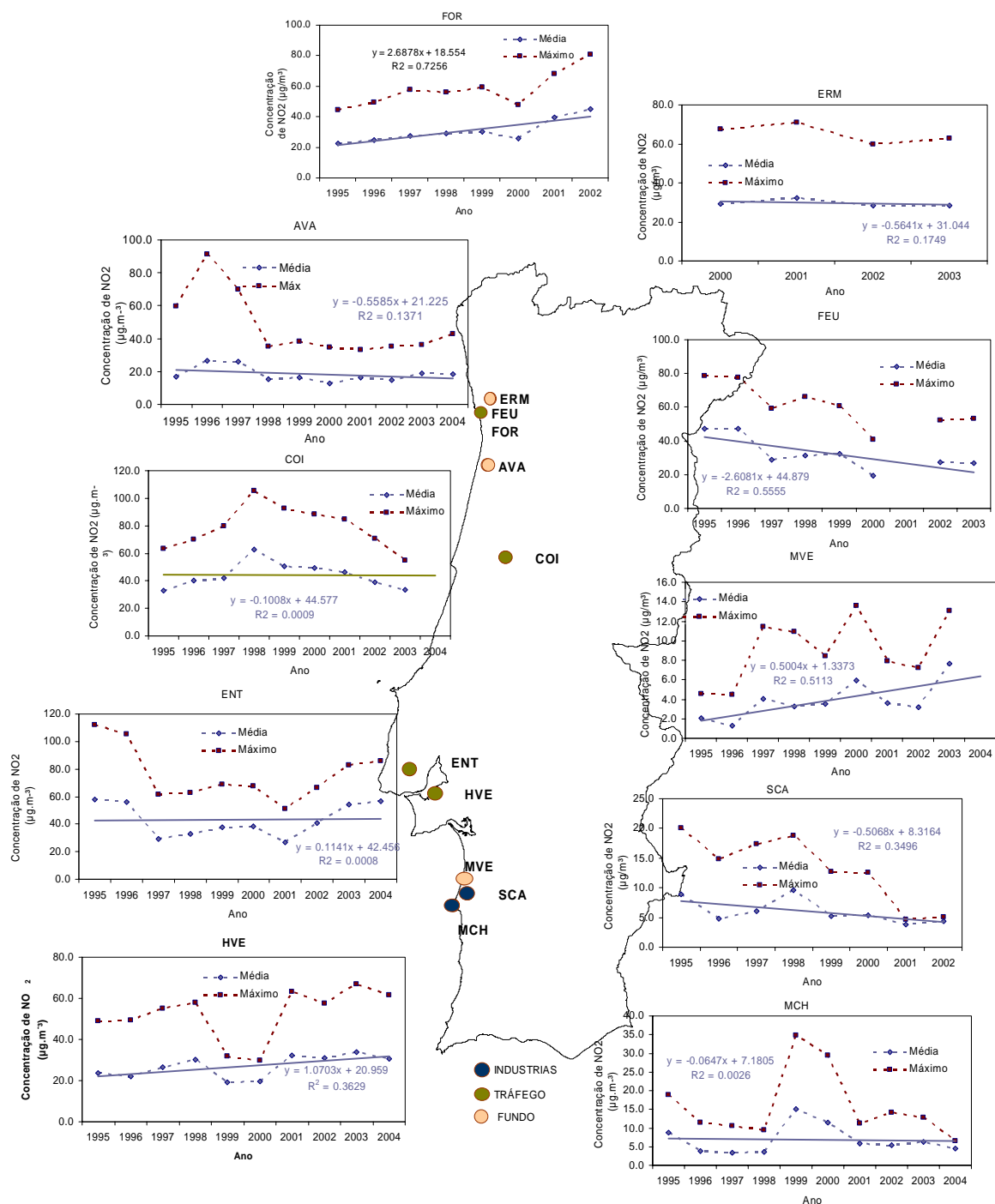


Figura 4.14: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelhos) de NO_x .

— **1** —



Poluente: O₃

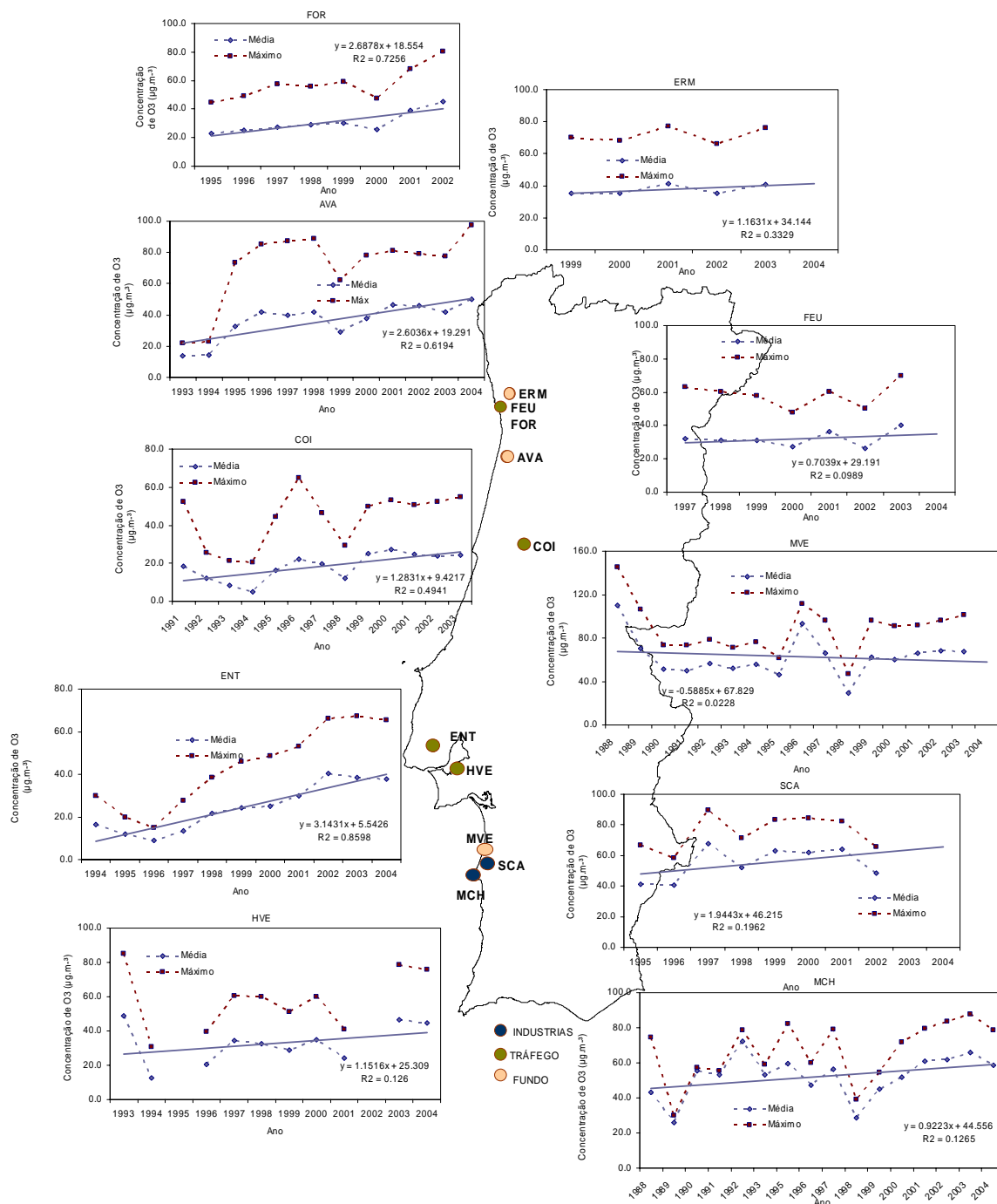


Figura 4.16: Tendência de concentrações médias anuais (azul) e médias dos máximos diários (vermelho) de O₃.

A análise realizada considerou a tendência dos quatro poluentes gasosos avaliados através da regressão linear aplicada às respectivas séries temporais. Contudo, este método é simplista na medida em que divide a variabilidade da série original em variações de frequência nula, ou seja lineares, e variações de não-tendência.

O cálculo da tendência das concentrações de ozono superficial verificada nas estações de qualidade do ar é uma tarefa complexa devido aos vários factores que a influenciam, tal como se descreveu no Capítulo 1, sobretudo devido à forte determinação das flutuações meteorológicas nesses valores (Wolff *et al.*, 2001), de natureza fortemente não linear e em muitos casos com comportamento cíclico de período conhecido, de que é um exemplo conhecido a variação de CO₂ na atmosfera.

Segundo os estudos feitos às tendências de O₃ nos EUA e Canadá, analisados por Wolff *et al.* (2001), a variabilidade nas concentrações de ozono induzidas pela variabilidade nas condições meteorológicas é muito maior do que as imposições às emissões dos seus precursores, pelo menos nas duas últimas décadas do Século XX. Tal facto indica que se deverá remover o efeito da variabilidade meteorológica da série temporal de ozono para se proceder ao estudo da tendência de longo termo existente nas séries temporais.

Porter *et al.*, 2001, apresentam um modelo geral da influência das diferentes escalas temporais nas concentrações de ozono como:

$$O_t = L_t + \Delta_t + S_t + P_t + D_t + W_t \quad \text{Equação 4.1}$$

onde:

L_t é a variação de baixa frequência devida a alterações não lineares no clima ou implementação de legislação reguladora;

Δ_t é uma função degrau para explicar desvios introduzidos por alterações na instrumentação, processos de manipulação de dados, ou forma de reportar os dados;

S_t representa processos sazonais

P_t está associado a comportamentos periódicos ou quase periódicos para períodos diferentes do ano ou do dia;

D_t é a oscilação diária;

W_t representa as oscilações mais rápidas, de escala sinóptica e meso-escala.

Vários métodos têm sido aplicados na separação das várias componentes que representam os diferentes processos dinâmicos incluídos nas séries temporais de poluentes atmosféricos e de variáveis meteorológicas. Eskridge *et al.* (1997) e Hogrefe *et al.* (2003) mostram as vantagens de utilização de filtros Kolmogorov-Zurbenko (KZ) em relação a outras metodologias de análise de séries temporais. As vantagens apresentadas relativas a este tipo de análise residem sobretudo na sua fácil utilização, na sua eficiência na separação de bandas de frequência, associadas a fenómenos dinâmicos de determinada escala, e na sua capacidade de manipulação de séries com falhas de dados. A utilização dos filtros KZ

requer a aplicação prévia da função logarítmica à série original dos dados de ozono para remover a variação sazonal das componentes de curta duração.

O filtro KZ é um filtro de médias móveis de m pontos que se aplica k vezes. Assim, m e k definem o filtro e pretendem separar dados com frequências dadas por

$$N = m * \sqrt{k} \quad \text{Equação 4.2}$$

As frequências de corte estão associadas à escala do processo. Dada a dimensão das séries de concentração horária de ozono originais, estas separaram-se em cinco componentes temporais: componente de longo termo (LT), componente sazonal (S), componente sinóptica (SY), componente diurna (DU) e componente intradiária (ID) (Hogrefe *et al.*, 2003), tendo-se desprezado qualquer influência de uma provável função degrau. A componente LT reflecte as variações no clima, alterações no uso do solo e nas emissões que ocorrem ao longo dos anos; as variações sazonais de ozono, associadas à componente S, resultam das variações associadas ao ciclo solar anual; A passagem dos sistemas sinópticos sobre uma dada região, com duração de dias a semanas, reflecte-se nas variações associadas à componente SY; a componente DU explica-se pelo ciclo solar de 24 horas; finalmente, a componente ID incorpora as flutuações nas concentrações de ozono medidas devido a variações locais da mistura atmosférica, como por exemplo a turbulência, meteorologia de micro e meso-escala, e variabilidade espacial e temporal de emissões de precursores de ozono.

A decomposição espectral das diferentes componentes determina-se através da escolha apropriada dos parâmetros m e k , em $KZ_{m,k}$, como se referiu anteriormente. As flutuações intradiárias de alta-frequência são separadas recorrendo a uma janela efectiva de 8,7 horas ($m=5, k=3$). Após a remoção destas frequências da série aplica-se novamente um filtro de modo a isolar as variações diárias ($m=29, k=3$), obtendo-se uma nova série contendo variações menores que 2,1 dias e maiores que 8,7 horas. As variações superiores a 2,1 dias e menores que 0,4 anos conseguem-se isolar pela aplicação do filtro $m=1767$ e $k=5$. As variações de longo termo, com variações temporais superiores a 1,7 anos, e as variações sazonais (que representam ciclos 0,4 a 1,7 anos) são separadas através de filtro $KZ_{8759,3}$. Assim, tem-se

$$\begin{aligned} ID(t) &= \ln[O_3(t)] - KZ_{5,3} \{ \ln[O_3(t)] \} \\ DU(t) &= KZ_{5,3} \{ \ln[O_3(t)] \} - KZ_{29,3} \{ \ln[O_3(t)] \} \\ SY(t) &= KZ_{29,3} \{ \ln[O_3(t)] \} - KZ_{1767,5} \{ \ln[O_3(t)] \} \\ S(t) &= KZ_{1767,5} \{ \ln[O_3(t)] \} - KZ_{8759,3} \{ \ln[O_3(t)] \} \\ LT(t) &= KZ_{8759,3} \{ \ln[O_3(t)] \} \end{aligned}$$

De modo a que,

$$\ln[O_3(t)] = ID(t) + DU(t) + SY(t) + S(t) + LT(t) \quad \text{Equação 4.3}$$

e a série original deverá ser reproduzida através da expressão

$$O_3(t) = e^{ID(t)} * e^{DU(t)} * e^{SY(t)} * e^{S(t)} * e^{LT(t)} \quad \text{Equação 4.4}$$

A metodologia de aplicação dos filtros KZ a séries temporais de poluentes gasosos pode fornecer informação relevante consoante a classificação das estações de qualidade do ar em estudo (tráfego, rural e industrial). Deste modo, espera-se que a contribuição da variabilidade relativa de cada uma das componentes temporais definidas reflecta o tipo de estação.

Santos (2005) apresenta a separação das séries de ozono através de filtros KZ aplicada às séries horárias de ozono medidas nas estações de Avanca e Teixugueira apenas para o ano de 2003. Neste caso, as frequências de corte associadas à contribuição relativa dos processos temporais em jogo foram diferentes das usadas no presente trabalho devido à diferença dos fenómenos subjacentes às séries temporais analisadas.

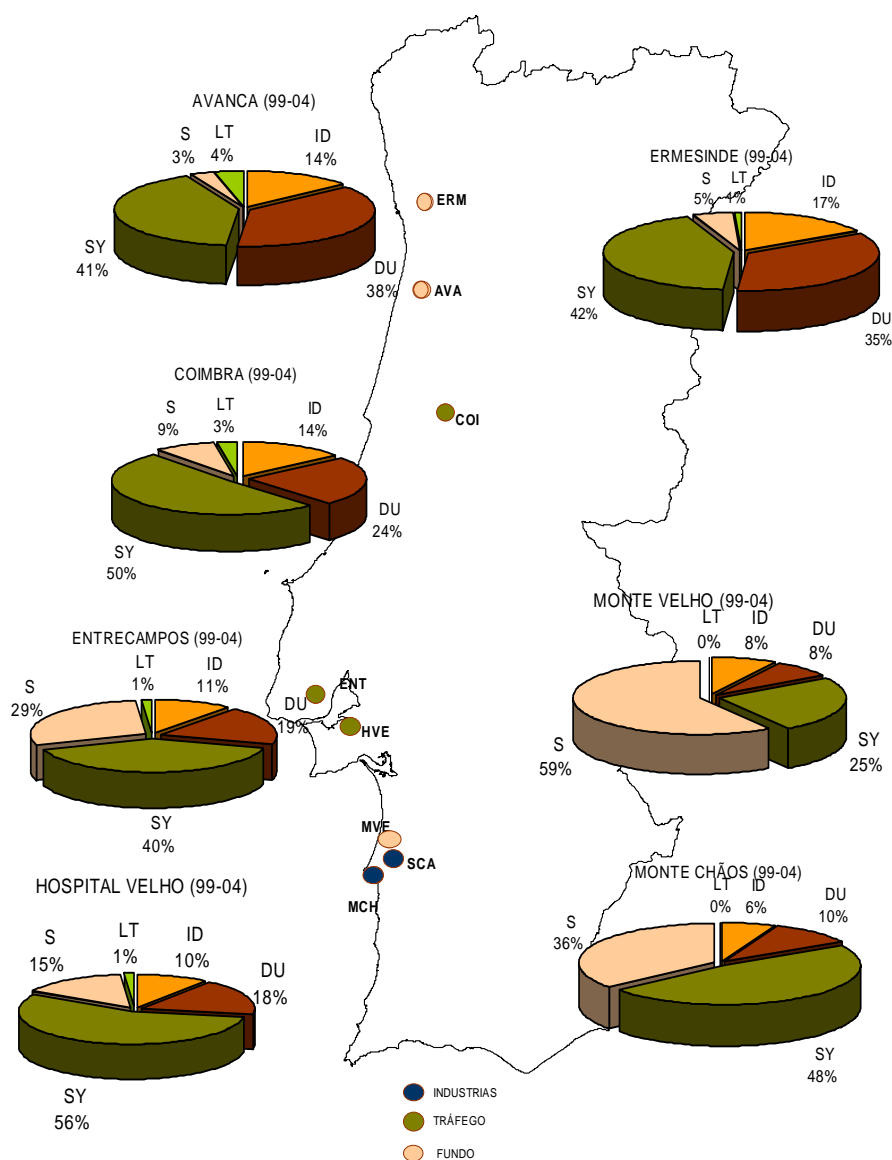


Figura 4.17: Contribuição de cada componente temporal na variação da concentração de ozono nas séries de 1999-2004, inclusive.

Das estações de qualidade do ar sujeitas a análise, a que apresenta a série mais longa é a estação de Monte Velho (1988-2004), e a mais curta a obtida em Ermesinde, entre 1999 e 2004. Contudo, para se poderem comparar os diferentes tipos de estações houve necessidade de uniformizar o período de tempo sujeito à aplicação dos diferentes filtros, entre 1999 e 2004. Assim, a Figura 4.17 agrupa a distribuição das contribuições das diferentes componentes para a variabilidade total das concentrações de ozono medidas neste período nas estações de Ermesinde, Avanca, Coimbra, Entrecampos, Hospital Velho, Monte Velho e Monte Chãos. A maior variabilidade das séries de ozono estudadas, entre os 40 e os 56 %, está associada à componente sinóptica, com excepção de Monte Velho cuja contribuição se situa cerca dos 25 %.

Focalizando sobre as estações consideradas de fundo pode observar-se que as de Ermesinde e Avanca revelam contribuições relativas das componentes sinóptica e sazonal semelhantes entre si, em que a componente sazonal apresenta valores inferiores a 10 % da variabilidade total. Tal não acontece com a estação de Monte Velho, em que a maior contribuição para a variabilidade total está associada aos fenómenos de natureza sazonal (59,2 %). A estação de Monte Chãos, cuja localização dista alguns quilómetros da estação de Monte Velho, mas que está classificada como industrial, apresenta também uma grande percentagem de variabilidade associada à componente sazonal, sendo a componente sinóptica a mais importante, tal como acontece nas restantes estações.

Pela observação da Figura 4.17 pode constatar-se que a variabilidade sazonal se torna mais importante nas estações do Sul do país, independentemente da classificação, e consequente localização, da estação de qualidade do ar. Possíveis explicações para estes resultados podem residir na forma como se fazem sentir os fenómenos de escala intradiurna ao longo da costa Atlântica em Portugal. Coutinho (1995) fez notar a forma como a progressão da brisa se diferencia entre o Norte e o Sul do país. Segundo este autor os fenómenos orográficos das Serras de Montejunto e Arrábida tornam-se um obstáculo à progressão da brisa tal como é feita no Norte do País. Contudo, não serão apenas estes os motivos pelos quais a progressão das brisas de mar se podem apresentar de forma distinta entre o Norte e Centro e o Sul do país. O Norte do país apresenta cadeias montanhosas aproximadamente paralelas à costa, que se estendem até ao Sul da latitude de Coimbra, induzindo ventos anabáticos e catabáticos de orientação semelhante às das brisas de terra e mar. Pelo contrário, a região do Alentejo, incluída a costa, apresenta-se com regiões de orografia suave. Como se sabe, os fenómenos de brisa estão condicionados pelo diferencial de temperatura entre a Terra e a água. No Verão, a componente meridional do vento é acentuada, o que promove os fenómenos de *upwelling* costeiro e a consequente diminuição da temperatura à superfície da água sobre o Oceano Atlântico. A diferença de batimetria ao largo da costa Norte e da costa Alentejana induz a diferenças climatológicas nas temperaturas das águas superficiais (Ferreira, 1984). A aplicação dos filtros KZ põe ainda em evidência a particular importância que a componente sazonal assume na variabilidade das séries das concentrações de ozono nas estações situadas mais a Sul de Portugal continental. Assim, parece haver aqui um indicador de que a baixa térmica, acima descrita, cujas características sobre a Península Ibérica variam espacialmente (para descrição mais pormenorizada consultar Hoinka e Castro, 2003) e com maiores frequências de ocorrência

nos períodos de Junho a Agosto, poderá impor-se nas regiões mais a Sul e explicar a maior variabilidade associada a escala temporal sazonal.

No que se refere a estações classificadas como de tráfego, estudos realizados por Maxwell-Meier e Chang (2004) mostraram que estas apresentam uma contribuição das componentes intradiárias e diárias superiores às verificadas nas estações rurais, para estas mesmas componentes. Nas três estações analisadas, Coimbra, Entrecampos e Hospital Velho, há uma contribuição forte destas componentes, e se comparadas com as estações rurais e industriais a Sul de Portugal observa-se que o seu peso relativo é importante. Todavia, sobressai o facto de se verificar uma maior contribuição destas componentes na variabilidade total dos resultados em estações de fundo situadas mais a Norte, Avanca e Ermesinde. Este resultado foi evidenciado em Santos (2005) na estação de Avanca apenas relativamente ao ano de 2003. Estas estações poderão estar a ser fortemente influenciadas pela pluma de ozono formada a partir de precursores emitidos a montante. Vários estudos indicam que as circulações de brisa de terra-mar, que se incluem nos fenómenos que influenciam as componentes diárias e intradiárias, transportam os poluentes durante a manhã em direcção ao Oceano Atlântico, com a brisa de terra. Estes irão produzir ozono que durante a tarde se advectiona com a brisa de mar sobre o continente, mais a Sul (Coutinho, 1995; Barros, 1999; Monteiro, 2003). Resultado interessante é também aquele que mostra que a componente de tendência de longo termo tem mais importância nas estações de Avanca e Coimbra. Ou seja, embora sejam estações de cariz diferente parecem estar igualmente sujeitas às variações de longo termo.

Tal como referido anteriormente, são as variações de longo termo que se pretende que reflectam alterações no clima, nas emissões e uso do solo ao longo do tempo. Será a análise desta componente que irá ser realizada em relação às concentrações de ozono no tempo.

A evolução da componente de tendência calculada para oito estações, pode observar-se na Figura 4.18, para a qual é possível verificar uma tendência crescente. Estes resultados estão de acordo como os obtidos pelo método dos mínimos quadrados, em todas as estações analisadas, o que evidencia que apesar de haver uma diminuição, ou manutenção das concentrações de precursores de ozono, a concentração deste poluente tem vindo a aumentar. Contudo, os resultados da componente de tendência evidenciam a existência de ciclos de baixa frequência sobrepostos às tendências de crescimento das concentrações de ozono ao longo do tempo. A origem destes ciclos deverá ser investigada já que os mínimos de médias anuais de ozono verificados nas séries temporais estão desfasados, aparentemente, dos aumentos das concentrações médias de NO e NO₂. Por outro lado, sabe-se que a atmosfera apresenta oscilações na sua dinâmica que podem ou não ser cíclicas. O Índice de Oscilação Sul, o Índice de Oscilação Atlântico (NAO) Norte, a oscilação quasi-bienial (QBO) são exemplos destas oscilações e que poderão influenciar os ciclos de baixa frequência encontrados nas séries de tendência de longo prazo de ozono em superfície. A baixa troposfera tem como um dos componentes do seu balanço a troca deste composto entre a estratosfera e a troposfera, através de zonas de grande turbulência como as que são provocadas pela corrente de jacto e a posição desta sobre a Europa parece estar extremamente relacionada com a fase da NAO.

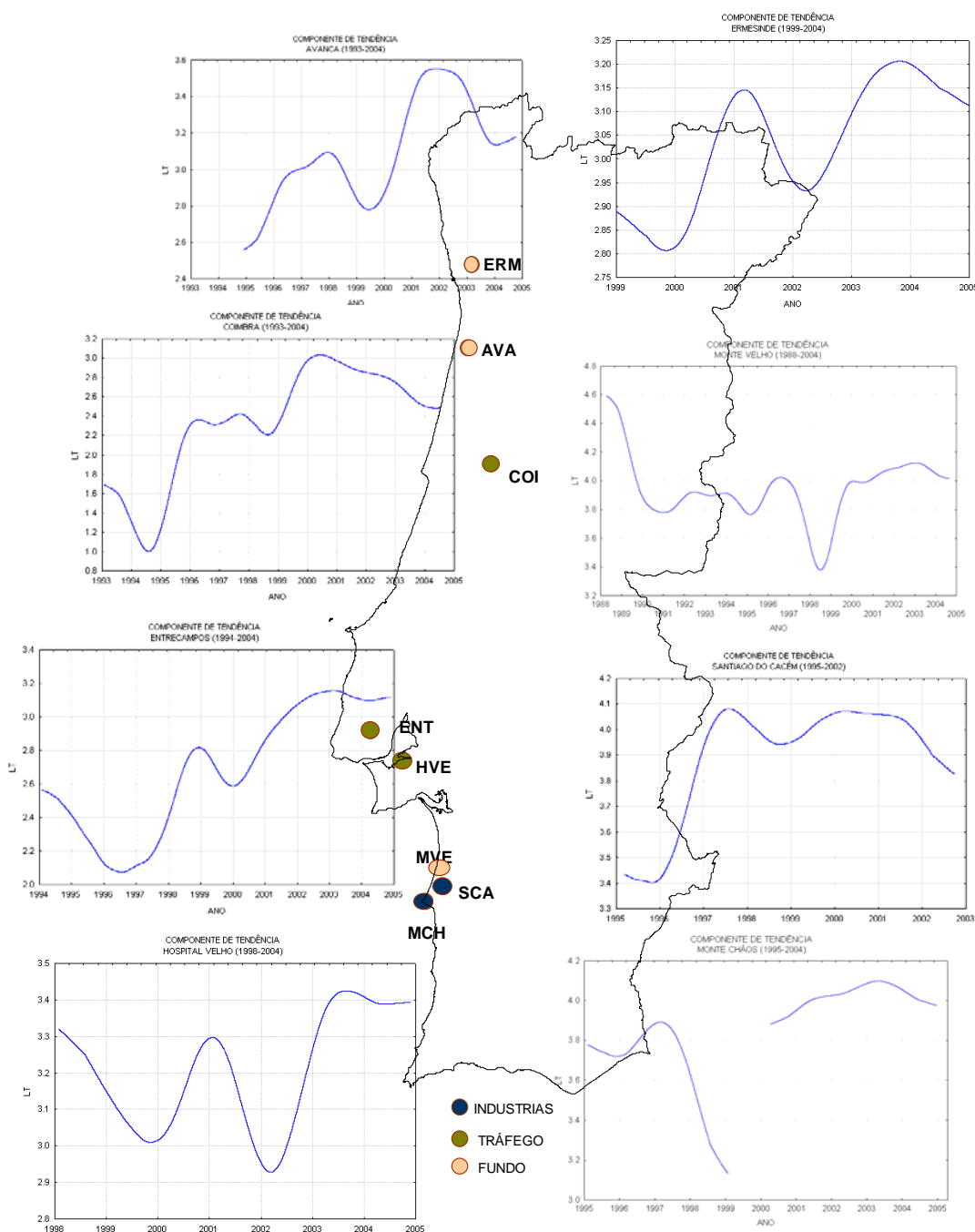


Figura 4.18: Componente de tendência obtida por aplicação dos filtros KZ.

Os ciclos observados na Figura 4.18 e a correlação obtida entre condições de estabilidade no Inverno e as concentrações de ozono superficial nesta estação do ano poderão estar relacionados com fenómenos de intrusão de ozono estratosférico em superfície. Estas ocorrências estão muitas vezes associadas à passagem de superfícies frontais, que por sua vez reflectem a posição da corrente de jacto, cuja posição média varia de ano para ano. A verificação da ocorrência de episódios de ozono em superfície durante o Inverno, e muitas

vezes de madrugada, levou à tentativa de uma descrição mais detalhada da dinâmica associada a estas situações e que se explorará no capítulo seguinte.

Capítulo 5

5 Intrusões de ozono estratosférico na baixa troposfera em Portugal

Como se teve oportunidade de verificar no Capítulo 2, Figura 2.8 na secção 2.2, existe mistura ocasional das diferentes camadas da atmosfera através de processos dinâmicos. Estes mecanismos não são de desprezar quando se consideram os balanços de constituintes atmosféricos, nomeadamente no que se refere ao ozono. A contribuição das trocas deste poluente entre a estratosfera e a troposfera estima-se ser cerca de 20 % do ozono produzido fotoquimicamente na troposfera (Brasseur *et al.*, 2003), e envolve, sobretudo o ozono da baixa estratosfera por introdução deste na troposfera livre, com posterior transporte para a camada limite.

Em Portugal, não existem quantificações do fluxo de ozono entre a estratosfera e a troposfera capaz de influenciar a qualidade do ar, todavia parece existir indicação de que o transporte dinâmico deste poluente entre estas duas camadas seja importante. No capítulo 4, os resultados das correlações entre os parâmetros de estabilidade da atmosfera e as concentrações de ozono em superfície, calculados a partir de radiossondagens, apresentam correlações estatisticamente mais significativas com as estruturas termodinâmicas verificadas no Inverno. Estas estruturas reflectem, de certa forma, a dinâmica presente na atmosfera.

Os registos existentes das concentrações horárias de ozono à superfície, em redes de monitorização da qualidade do ar e obtidas em campanhas de amostragem, mostram valores anormalmente elevados durante condições de tempo desfavoráveis à produção fotoquímica (Elbern *et al.*, 1997). Em Lisboa e em Madrid (Barros, 1999 e Borrego *et al.*, 2004), existem valores de ozono medidos que atingem quinze vezes o valor de fundo, o que mostra a importância destes eventos na presença de ozono à superfície. Contudo, este tipo de ocorrência é ignorado muitas vezes ou atribuído a erros de monitorização.

Na sequência destes resultados e a partir do conhecimento de um conjunto de ultrapassagens ao limiar de informação registadas em várias estações de qualidade do ar da Comunidade de Madrid em Abril do ano 2000 (San José *et al.*, 2005; ver no Anexo III os valores de ozono medidos em várias estações de qualidade do ar da área metropolitana de Madrid) surgiu o projecto STRATOZON – “O ozono estratosférico na baixa troposfera sobre Portugal”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. Este projecto teve

como principais objectivos a identificação e justificação de episódios de ozono à superfície cujo mecanismo de produção fotoquímica não pudesse sustentar a sua ocorrência.

O presente capítulo ilustra alguns dos desenvolvimentos realizados no estudo de episódios de ozono em superfície por eventual enriquecimento através de massa de ar estratosférica. A abordagem incidiu na aplicação integrada da modelação numérica meteorológica e fotoquímica a ocorrências verificadas sobre a Península Ibérica e que difere da que está a ser seguida por Henriques (2004), a qual tem como base os dados diários de tropopausas múltiplas e coluna total de ozono.

5.1 Mecanismos de troca de massas de ar entre a estratosfera e a troposfera

A troca de ozono entre as diferentes camadas da atmosfera, nomeadamente entre a camada limite atmosférica, a troposfera livre e a baixa troposfera, constitui actualmente um tópico científico importante quando se trata de estimar o balanço de ozono troposférico. As trocas de massas de ar estratosféricas-troposféricas desempenham um papel importante na distribuição de outros constituintes atmosféricos (aerossóis e gases de efeito de estufa), e a taxa de transporte entre as duas camadas afecta o seu balanço químico. Em 1964, Danielsen (Johnson e Vizee, 1981) apresentou uma explicação possível para este transporte na qual a massa de ar estratosférico penetra inicialmente na troposfera numa região depressionária em altitude, que está normalmente associada à corrente de jacto (Figura 5.1). Por outro lado, este padrão em altitude pode estar relacionado com uma depressão à superfície, geralmente associada a uma frente fria que se estende para sul, deixando uma região de altas pressões a oeste.

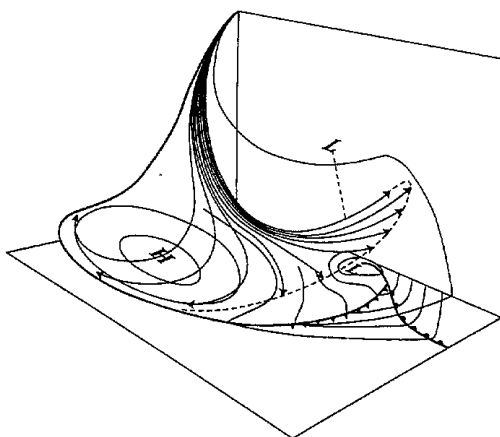


Figura 5.1: Trajectórias conceptuais de ar estratosférico de Danielsen (Johnson e Vizee, 1981).

Johnson e Vizee (1981) resumiram os mecanismos mais prováveis que controlam o transporte de ozono estratosférico na troposfera e que podem estar simultaneamente activos (Figura 5.2):

- i. dissipação da intrusão por mistura e difusão na troposfera livre;
- ii. persistência de intrusão até ao topo da camada limite atmosférica, onde a turbulência e a convecção são os processos responsáveis pela mistura do ar estratosférico;
- iii. intrusão próximo de superfícies frontais frias, onde a massa de ar rica em ozono é transportada directamente para a superfície por movimentos verticais descendentes associados à actividade frontal;
- iv. como no caso anterior, mas em que a entrada de ozono para a camada de mistura se dá por convecção frontal e pré-frontal com transporte para a superfície associado à ocorrência de precipitação.

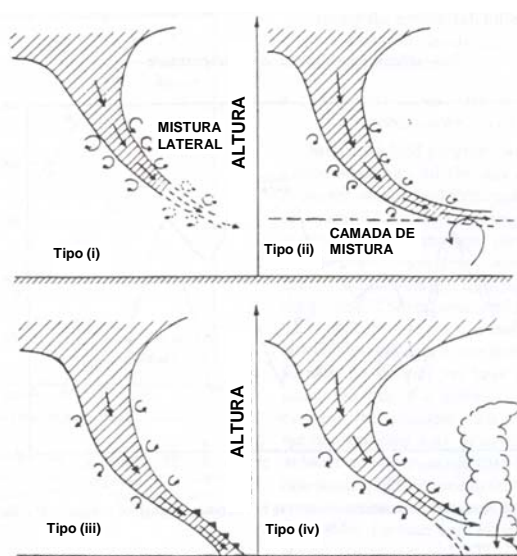


Figura 5.2: Mecanismos de transporte hipotéticos do ozono estratosférico na troposfera (Johnson e Viezee, 1981).

Contudo, Davies e Schuepbach (1994) nomeiam ainda outro possível mecanismo como sendo a mistura convectiva em depressões em altitude de maior dimensão. Estudos climatológicos indicam que são estes os processos extratropicais de transferência mais eficientes (Elbern *et al.*, 1998) e que as suas ocorrências significativas se restringem às latitudes médias, sendo mais intensas no Hemisfério Norte.

As “dobras” na tropopausa observam-se quando se verificam valores anómalos de vorticidade potencial isentrópica, normalmente em forma de “língua”, em direcção ao equador, e que se formam através do transporte isentrópico em perturbações ciclónicas e anticiclónicas de larga escala (Figura 5.3 e Figura 5.4). Em certas circunstâncias, estas depressões da tropopausa têm a forma de “línguas” estreitas, formando filamentos alongados; noutras circunstâncias formam-se estruturas coerentes contendo massas de ar com valores elevados de vorticidade potencial - gotas frias (Holton *et al.*, 1995). Holton *et al.* (1995) realçaram, ainda, a importância de se considerar todas as escalas envolvidas nas trocas estratosfera-troposfera, nomeadamente no Inverno do Hemisfério

Norte. Este facto é também confirmado por Elbern *et al.* (1998), que estimou a ocorrência à escala global de 11 000 “dobras” por ano, o que é significativo, considerando que as “dobras” são o processo mais importante de mistura de massas de ar estratosféricas e troposféricas.

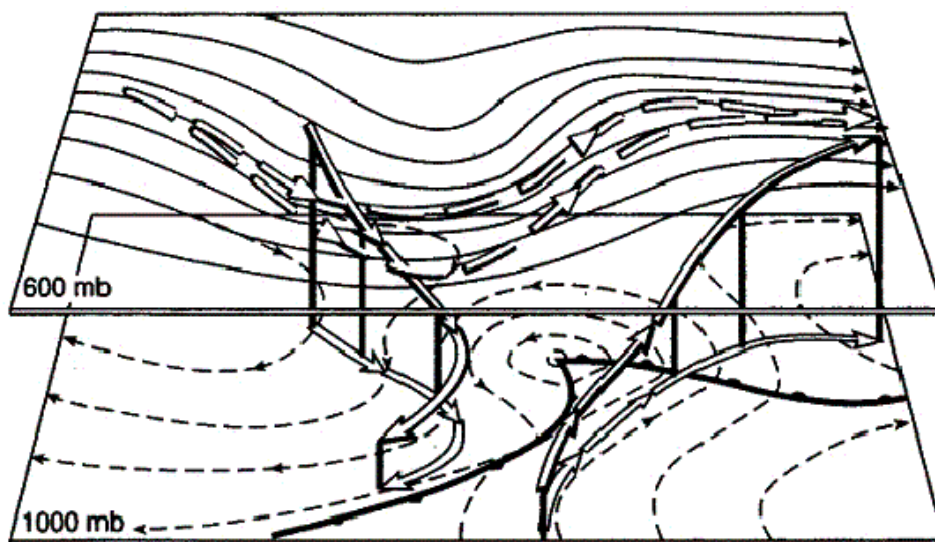
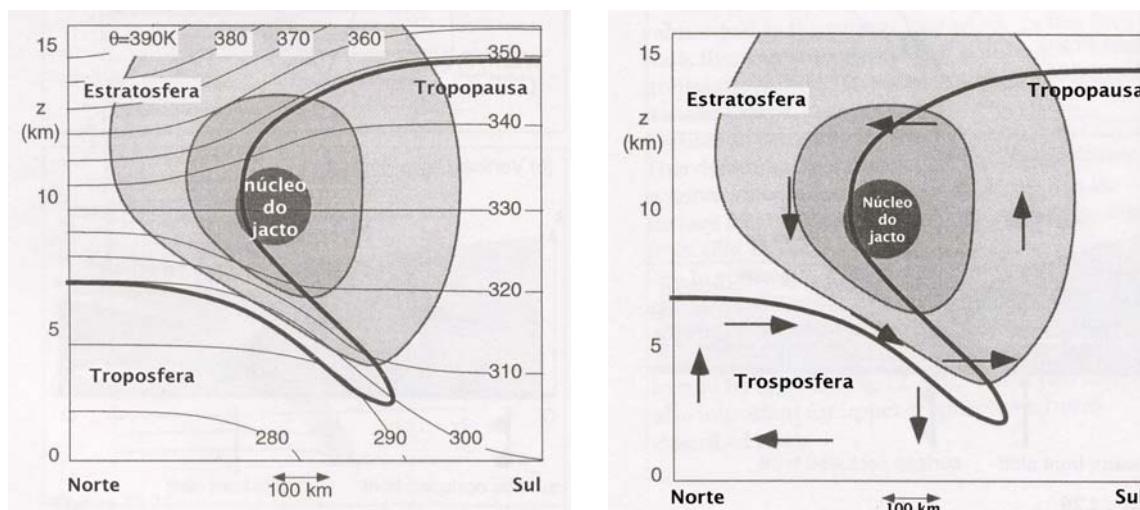


Figura 5.3: Perturbações ciclónicas e anticiclónicas de larga escala (Brasseur *et al.*, 1999).



a)

b)

Figura 5.4: Diagrama conceptual de uma secção transversal da corrente de jacto associada a uma frente na troposfera alta; a) linhas finas = isentrópicas, linha grossa = tropopausa, sombreados correspondem à velocidade do vento, cinza claro $\geq 50 \text{ m.s}^{-1}$, cinza médio $\geq 75 \text{ m.s}^{-1}$ e cinza escuro $\geq 100 \text{ m.s}^{-1}$; b) circulações dinâmicas transversais associadas à mesma frente (Stull, 2000).

Os eventos de intrusão de ar estratosférico de maior interesse são aqueles que conseguem atingir a superfície, pois alteram a composição química da troposfera através da mistura de

massas de ar com composição química diferente. Davies e Schuepbach (1994) indicam que as massas de ar estratosféricas podem ser detectadas à superfície, pois são caracterizadas por níveis de concentração elevados de ozono, índices de humidade baixa, níveis de concentração elevados de Berílio (Be), nos isótopos 7 e 10, por ser um gás gerado por raios cósmicos entre os 15 e 25 km, e pelo seu valor elevado de vorticidade potencial (Hov, 1998). Contudo, a ocorrência de eventos de grande intensidade que permitam a sua detecção é escassa.

As estações de monitorização de montanha têm uma probabilidade maior de registar eventos de intrusão. Estudos estatísticos baseados em registos de ^7Be , ozono e humidade relativa, para uma década, elaborados por Elbern *et al.* (1997), adquiridos em duas estações dos Alpes alemães – Zugspitze (2962 m) e Wank (1776 m) - mostram que os eventos de intrusão afectam Zugspitze durante 5 % do tempo e Wank menos de 2,5 %, aplicando o critério de o valor de ^7Be registado ser superior a duas vezes o valor do desvio padrão em comparação com a média móvel mensal. Trabalhos referidos por Zanis *et al.* (2003) apontam uma influência de 8,8 % por aplicação de um filtro com base nas concentrações de ozono aos dados de Zugspitze. Estas duas referências ilustram que a frequência absoluta de intrusões estratosféricas profundas depende muito dos valores limite especificados como critério para o ^7Be , ozono e humidade relativa.

Em Borrego *et al.* (2005b) descrevem-se, com detalhe, as abordagens na identificação de episódios de ozono com possibilidade de mistura de ar estratosférico em Portugal. Este trabalho decorreu na sequência da análise dos dados de ozono medidos em toda a Rede Nacional da Qualidade do Ar desde 1988 até 2002. Em primeiro lugar, as séries de dados foram validadas de acordo com a metodologia proposta pela Organização Meteorológica Mundial - OMM (WMO, 1994), seguida de análise estatística e pela identificação dos episódios com interesse para o projecto. Para a identificação dos episódios de ozono de interesse filtraram-se as séries originais de dados de acordo com os seguintes critérios (Barros *et al.*, 2004):

- Método de avaliação dos dados de ozono adoptado pela OMM (WMO, 1994);
- Data da ocorrência (episódios de Inverno detectados entre Novembro e Fevereiro);
- Hora da ocorrência (episódios registados durante a noite, entre as 21H00 UTC e as 7H00 UTC);
- Número de estações em que o episódio de ozono ocorreu simultaneamente (três ou mais estações);
- Número das regiões com ocorrência simultânea de episódios de ozono (duas ou mais).

Para a detecção de casos de estudo com eventual contribuição de ozono estratosférico considerou-se um episódio de ozono aquele em que o limiar de alerta à população de $180 \mu\text{g.m}^{-3}$ foi ultrapassado. Para além deste limite, filtraram-se ainda situações em que as concentrações de ozono ultrapassassem os $100 \mu\text{g.m}^{-3}$. Este valor resulta de um incremento de cerca de 20 % ao valor considerado razoável por muitos estudos, especialmente os de

modelação da qualidade do ar, como concentração de fundo de ozono imposta de $80 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Com esta metodologia obteve-se um conjunto de 165 episódios de ozono, ou seja, um número demasiado elevado para que a análise subjectiva das condições meteorológicas associadas a cada um deles possa ser descrita em tempo útil. Neste sentido, definiu-se a duração do episódio meteorológico associado, sendo que episódios de ozono registados em dias consecutivos, ou com um dia de intervalo, fazem parte do mesmo episódio meteorológico (Moreira *et al.*, 2005). Um episódio meteorológico assumiu-se, então, como tendo o seu início 10 dias antes do registo de concentrações elevadas de ozono e terminando dois dias após essa ocorrência.

Os critérios subsequentes de filtragem dizem respeito à existência de dados para a descrição das condições meteorológicas, nomeadamente existência de imagens de satélite de vapor de água, mas também a isolamento de episódios de ozono em superfície com maior probabilidade de origem estratosférica. Assim, apenas se consideraram aqueles cujos episódios meteorológicos não se sobrepusessem. Para o estudo detalhado destes episódios definiu-se, em torno dos dias de concentração elevada de ozono à superfície, um intervalo de tempo (episódio meteorológico) durante o qual se caracterizaram as condições meteorológicas à escala sinóptica e o comportamento da tropopausa sobre o Atlântico Norte e Europa (Borrego *et al.*, 2005b e Moreira *et al.*, 2005). Para este efeito utilizaram-se os campos meteorológicos provenientes das re-análises ERA-40 (ECMWF Re-Analysis, seguido do número de anos) do modelo numérico de previsão do European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF). Esta base de dados tem disponíveis campos de variáveis meteorológicas relevantes para o presente estudo, incluindo a vorticidade potencial e o mapa da tropopausa dinâmica (referida apenas como mapa da tropopausa). Estes campos estão disponíveis às 0, 6, 12 e 18 UTC, tendo uma resolução espacial de $2,5^\circ$. Também se utilizaram as imagens dos satélites Meteosat, disponíveis na base de dados do Instituto de Meteorologia (IM). Pretendeu-se identificar regiões com dobras da tropopausa, visto estas constituírem zonas de entrada de ar estratosférico na troposfera, de acordo com os processos já caracterizados por Danielson em 1968 (Johnson e Vienze, 1981). O mapa da tropopausa (por ex., Hoskins *et al.*, 1985) é especialmente importante por permitir identificar afundamentos de tropopausa. Uma variante deste mapa permite a sobreposição de isóbaras, que possibilita a identificação de dobras na tropopausa e, eventualmente, a detecção de “bolhas” de ar estratosférico na troposfera (Morgan e Nielson-Gammom, 1998).

Com o intuito de relacionar a ocorrência de episódios de ozono com afundamentos e dobras na tropopausa estudou-se a massa de ar que dá origem ao episódio de ozono à superfície recorrendo a um modelo de trajectórias desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Holandês (KNMI). Este modelo está disponível no ECMWF e necessita como dados de entrada dos dados de re-análise ERA-40 do ECMWF. Para além da metodologia acima descrita, foram também desenvolvidas no IM aplicações informáticas específicas de forma a obter, processar e visualizar campos meteorológicos, imagens de satélite e trajectórias (Moreira, 2004).

A possibilidade de intrusão de ozono estratosférico foi posteriormente investigada recorrendo ao sistema de modelação numérica MM5-CAMx. O modelo MM5 tem sido aplicado a estudos da dinâmica de intrusões estratosféricas seguindo diferentes abordagens, pelo que se justifica a sua aplicação através da descrição sumária de alguns trabalhos em que se fez uso dessa ferramenta numérica.

A partir da análise de 10 anos de medições de humidade relativa, ozono e ^7Be em duas estações de monitorização no Norte dos Alpes, Zugspitze e Wank, Elbern *et al.* (1997), previamente referida, seleccionaram três eventos de elevadas concentrações de ^7Be nestas estações de forma a diagnosticar, através de modelação, a que fenómenos da dinâmica da atmosfera se pudessem atribuir a introdução de massa de ar estratosférico na troposfera. O modelo MM5 foi aplicado na sua forma hidrostática, ainda nas suas primeiras versões, e as parametrizações escolhidas podem ser consultadas em Elbern *et al.* (1997). A partir das simulações com o MM5 e da análise conjunta de retrotrajectórias foi possível concluir que em dois dos eventos, um ocorrido no Verão (15-16 de Julho de 1986) e o outro na Primavera (16 de Março de 1991), a intrusão foi induzida por dobras na tropopausa. O outro evento, registado no Outono (26-28 Outubro de 1993), esteve associado a uma gota fria, e dobra correspondente. Estes 3 casos indicam que a entrada de ar estratosférico registada na estação de monitorização é um processo não local, induzido a mais de 2000 km. O transporte de ar a estas distâncias faz-se em cerca de 2-4 dias. Os estudos feitos ao longo das trajectórias através da tropopausa mostram que as parcelas de ar descem por subducção desde a ponta da intrusão, aos 400-500 hPa, até aos 700 hPa, atingindo a estação de monitorização de Zugspitze.

Num outro estudo, Elbern *et al.* (1998), com o intuito de testar e melhorar um algoritmo que identificasse objectivamente eventos de dobras de tropopausa a partir de dados do ECMWF, simulou alguns dos eventos seleccionados pela metodologia sugerida com o modelo MM5. Para casos de estudo particulares, comparou os resultados do modelo com a representação obtida directamente das variáveis do ECMWF. Um dos eventos seleccionados ocorreu a Oeste da Península Ibérica a 15 de Outubro de 1993. O modelo MM5 representa a dobra da tropopausa dinâmica e a inclinação das isentrópicas de forma mais abrupta que os dados originais do ECMWF. É possível verificar uma bolha de ar estratosférico centrada nos 800 hPa (neste trabalho considerou-se como valor de vorticidade potencial isentrópica que separa ar estratosférico de ar troposférico de 1,6 UPV, valor indicado pela OMM (Figura 5.5)).

Para estimar fluxos de massas de ar através da tropopausa sobre as latitudes médias, Kowol-Santen *et al.* (2000) usaram o MM5 como ferramenta de cálculo para aplicação do método de Wei na estimativa destes fluxos através da superfície de 1,6 UPV. Os resultados derivados pelo modelo MM5 são comparáveis aos fluxos calculados com base na análise de trajectórias.

Este tipo de eventos, e estudos com eles relacionados, têm sido simulados por outros modelos, apresentando-se os modelos meteorológicos como uma ferramenta indispensável na compreensão desta dinâmica. Veja-se para tal os trabalhos sobre a Europa efectuados

por Stohl *et al.* (2000), Schuepbach *et al.* (1999), Tulet *et al.* (2002) e Morgenstern e Craver (2001).

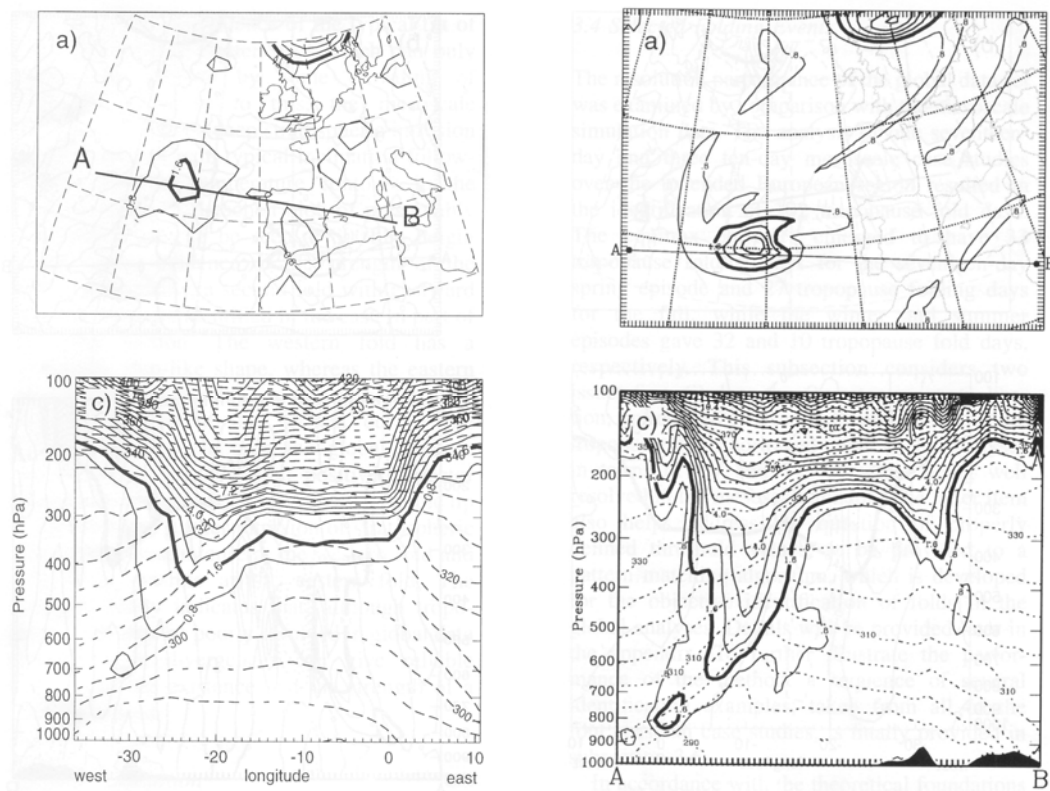


Figura 5.5: Vorticidade potencial isentrópica a 400 hPa em unidades UPV, no dia 15 de Outubro 1993, às 00H00 UTC e temperatura potencial nas secções verticais dos cortes AB. a) Dados do ECMWF; b) resultados do MM5 (Elbern *et al.*, 1998).

5.2 Ocorrências em Portugal: casos de estudo

Da base de dados respeitante a Portugal, simularam-se os episódios que a partir da análise detalhada das condições meteorológicas indiciam uma contribuição de massa de ar estratosférica, e um episódio que serve de contra exemplo, em que as concentrações de ozono medidas na rede nacional de qualidade do ar resultam da produção fotoquímica deste composto. Os resultados obtidos nas simulações efectuadas são enquadrados e descritos seguidamente.

5.2.1 Simulação e análise do episódio 1: Coimbra, Janeiro de 1996

Identificou-se uma ultrapassagem ao limiar de informação ao público em Coimbra, no dia 17 de Janeiro, cuja concentração de ozono registada corresponde a $182 \mu\text{g.m}^{-3}$, às 14H00. Contudo, a análise detalhada do filtro de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ mostrou uma sequência de dias

consecutivos com concentrações de ozono superiores a este limiar (ver Tabela 5.1). Este aspecto é importante na medida em que a estação de Coimbra se situa na Avenida Fernão Magalhães, classificada por essa razão como estação urbana de tráfego automóvel. Esta estação de qualidade do ar está activa desde 1992 e cumpre a eficiência de aquisição de dados superior a 75 %, em termos anuais, desde 1995, inclusivamente, o que torna o seu histórico de dados relativamente completo (Borrego *et al.*, 2003a; Borrego *et al.*, 2003b e Borrego *et al.*, 2005b). Um dos resultados deste estudo evidencia que as médias mensais das concentrações de ozono das estações urbanas em Portugal apresentam valores de concentrações de ozono baixas, em geral, e a de Coimbra não é excepção (Figura 5.6). No mesmo período, detectaram-se valores de concentração de ozono acima dos $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ a 8 e 9 de Janeiro em Monte Chãos e entre 9 e 12 de Janeiro na estação de Monte Velho. Pensa-se que estes valores não sejam resultado de produção fotoquímica já que durante este período a passagem de frentes activas sobre a Península Ibérica é bem visível em imagens de satélite (consultar para o efeito o site da Internet da Eumetsat, a rubrica Historical Image Data, URL 16)

Tabela 5.1: Concentrações de ozono superiores a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ em Janeiro de 1996 em Portugal.

Dia	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Coimbra	133	137	155	155	104	128		129	128	104	129	155	182	106	104	118	104
Monte Chãos				108	104												
Monte Velho					108	112	106	112									

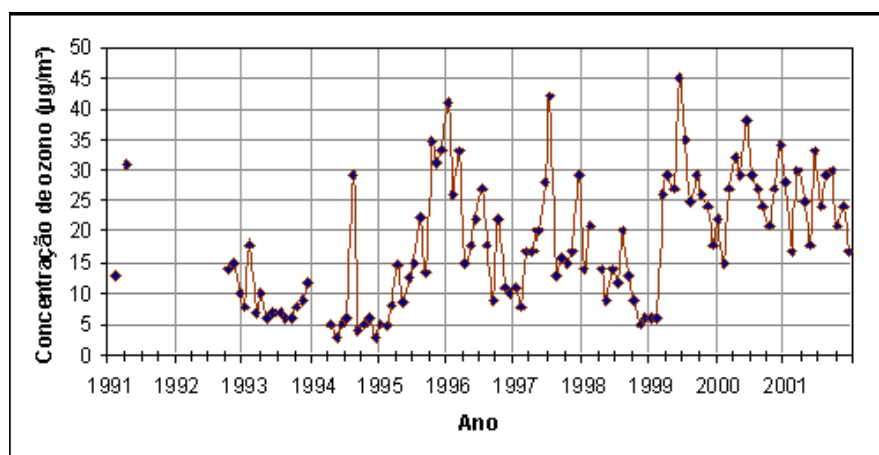


Figura 5.6: Concentração mensal média de ozono em Coimbra.

As médias mensais em Coimbra mostram uma grande variabilidade interanual. Os anos de 1997, 1999, 2000 e 2001 revelam os picos elevados de ozono no Verão. São também notórios picos de ozono nos meses de Outono e Inverno, como no início de 1996 e finais de 1997, por exemplo.

O episódio meteorológico associado a este evento está balizado entre os dias 5 e 19 de Janeiro de 1996. A sua descrição (Borrego *et al.*, 2005b) consiste na passagem de sistemas frontais que influenciaram o tempo em Portugal Continental, nos dias 5, 6, 9 e 11 de Janeiro. Detectaram-se sistemas depressionários a influenciar a Península Ibérica também a 12, 13 e 14 de Janeiro. Nos dias 16 e 17 de Janeiro o fluxo rodou para leste. No dia 17 de Janeiro, a massa de ar sobre Portugal é de origem polar continental, associada ao fluxo fraco de Leste descrito para o dia anterior. A nebulosidade é fraca e a pressão de 1017 hPa, tendo-se registado 18,6° C de temperatura máxima.

Leitão e Moreira (2004) identificaram três momentos em que a possibilidade de intrusão de ar estratosférico poderia ter ocorrido, a partir da análise da sobreposição das retrotrajectórias com o mapa da tropopausa e ainda com o mapa de “bolhas” de ar estratosférico:

Hipótese 1: Entre o dia 06 às 18 UTC e o dia 07 às 12 UTC, enquanto se dá a travessia das partículas pela América do Norte, entre a Baía de Hudson e o Mar do Labrador.

Hipótese 2: Entre o dia 08 às 12 UTC e o dia 10 às 06 UTC, durante o percurso sobre a América do Norte e o Atlântico.

Hipótese 3: No dia 11 entre as 12 e as 18 UTC, segundo diversas retrotrajectórias, a partícula encontra-se numa região que é atravessada por uma anomalia da tropopausa.

O modelo MM5, versão 3, foi aplicado a um período mais curto, entre 9 e 19 de Janeiro de 1996, do que o episódio meteorológico definido previamente para este evento. A simulação meteorológica a partir do dia 5 de Janeiro apenas teria interesse para seguir os afundamentos que se identificaram como possíveis de afectar a concentração de ozono em superfície pela hipótese 1. Todavia, a aplicação do MM5 ao domínio definido de modo a abranger a parte NE da América do Norte e a Península Ibérica não se revelou possível, por incompatibilidade entre a escala de aplicabilidade do modelo e a que se pretende estudar. Por outro lado, houve questões técnicas que necessitaram ser salvaguardadas, como por exemplo a compatibilidade entre os domínios definidos para o modelo MM5 e a área sobre Portugal, de maior resolução, a considerar pelo CAMx.

Assim, definiram-se regiões de aplicação comuns a todos os episódios simulados, com 23 níveis sigma verticais, de características horizontais que figuram na Tabela 5.2 e que se encontram também representados na Figura 5.7.

Tabela 5.2: Definição dos domínios de simulação.

Domínio	Nº Células (O-E x N-S)	Resolução (km)
D1	58 x 47	90
D2	52 x 52	30
D3	55 x 85	10

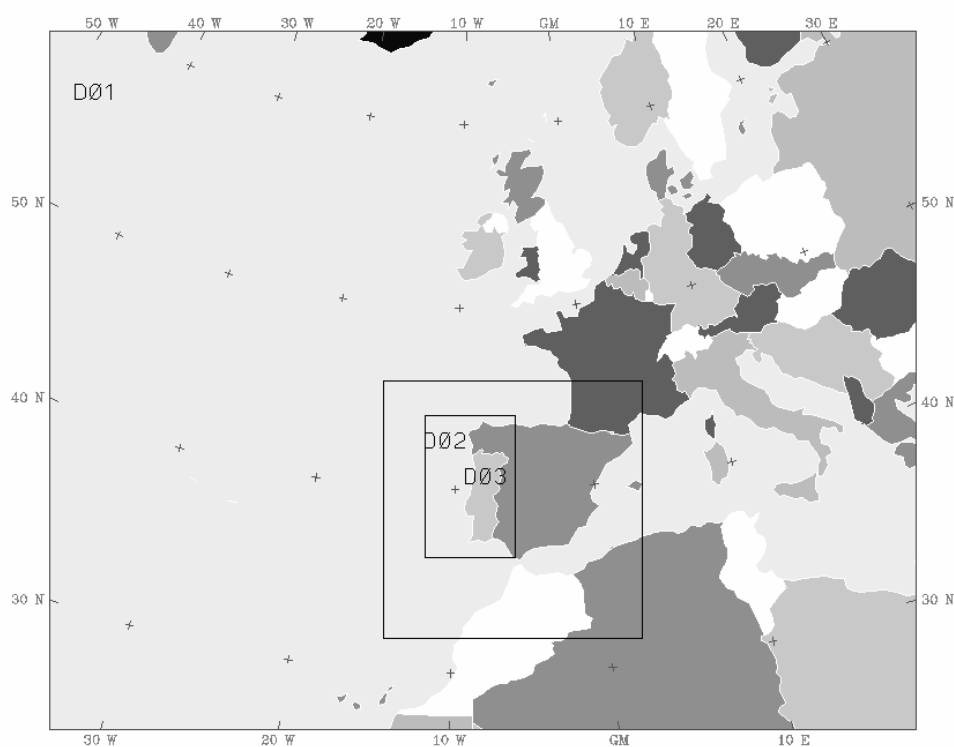


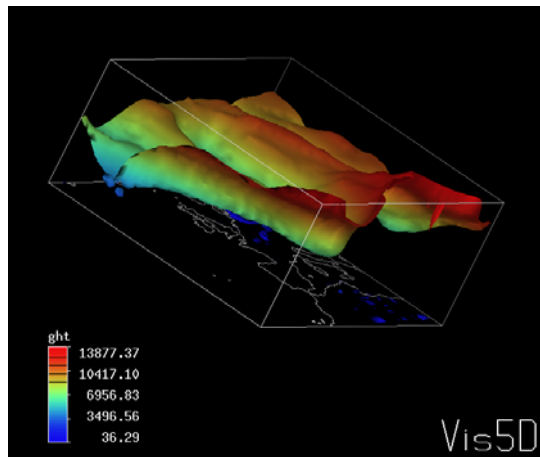
Figura 5.7: Domínios do MM5 usados nas simulações de episódios seleccionados.

Os resultados do modelo MM5 foram visualizados recorrendo a duas ferramentas, o VIS5D (URL 17) e o GRADS (URL 18). Os instantes seleccionados para esta descrição estão de acordo com a hipótese 2 para intrusão de massa de ar estratosférico na troposfera livre sugerida em Borrego *et al.* (2005b) para este episódio: ou seja, que a partícula que chegou a Coimbra no dia 17 de Janeiro se encontrava em ar troposférico entre as 12H00 UTC do dia 8 de Janeiro e a mesma hora do dia 9, no mesmo mês, numa região de grande actividade da tropopausa. A conclusão do estudo desta hipótese sugere uma possibilidade de passagem de ar estratosférico para ar troposférico, uma vez que durante este período a tropopausa apresenta uma grande actividade perto da região onde a partícula se encontrava.

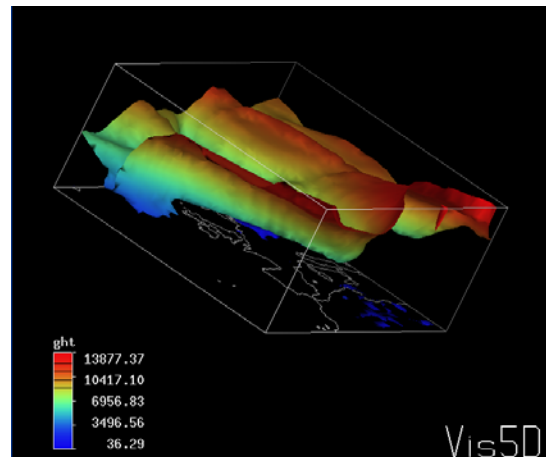
Tal é visível na representação tridimensional da isosuperfície de 1,5 UVP, sobre o domínio 1 de aplicação do MM5, em que a coloração diz respeito à altura de geopotencial a que este valor de unidade de vorticidade potencial se encontra (Figura 5.8). Como se pode verificar, a tropopausa dinâmica está bastante activa na parte Noroeste do domínio de simulação, sobre a região identificada anteriormente na hipótese 2. A altitudes inferiores a 3500 m de altura de geopotencial é possível verificar que a superfície de 1,5 UPV forma uma “cunha” em massa de ar troposférica que se estende de Norte para Sul.

São também observáveis afundamentos profundos da tropopausa em momentos posteriores, sobre a parte Norte do domínio 1 de simulação a altitudes baixas sobre o Atlântico Norte (Figura 5.9). A observação desta Figura justifica muita atenção devido à

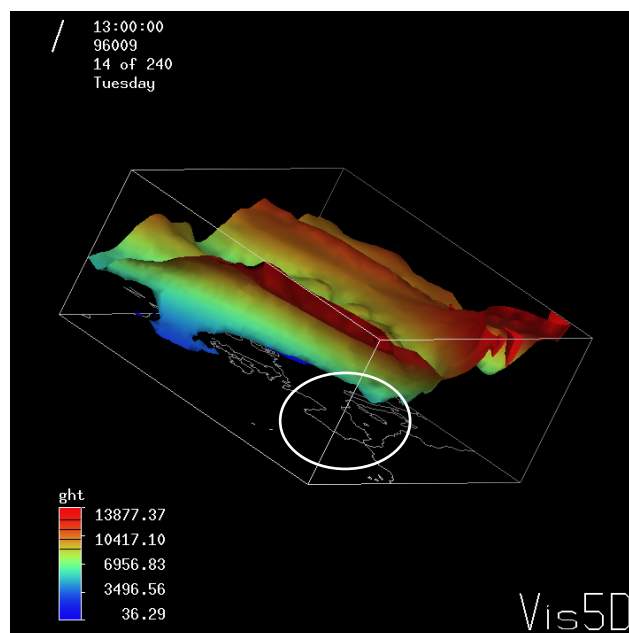
presença de regiões de elevados valores de UPV a baixa altitude associadas ao seu forte arrefecimento, nomeadamente sobre a Federação Russa.



9 de Janeiro 1996, 00H00 UTC



9 de Janeiro 1996, 06H00 UTC



9 de Janeiro 1996, 13H00 UTC

Figura 5.8: Isosuperfície de vorticidade potencial isentrópica de 1,5 UPV a 9 de Janeiro de 1996 às 00H00, 06H00 e 13H00 UTC (o círculo indica a localização da Península Ibérica).

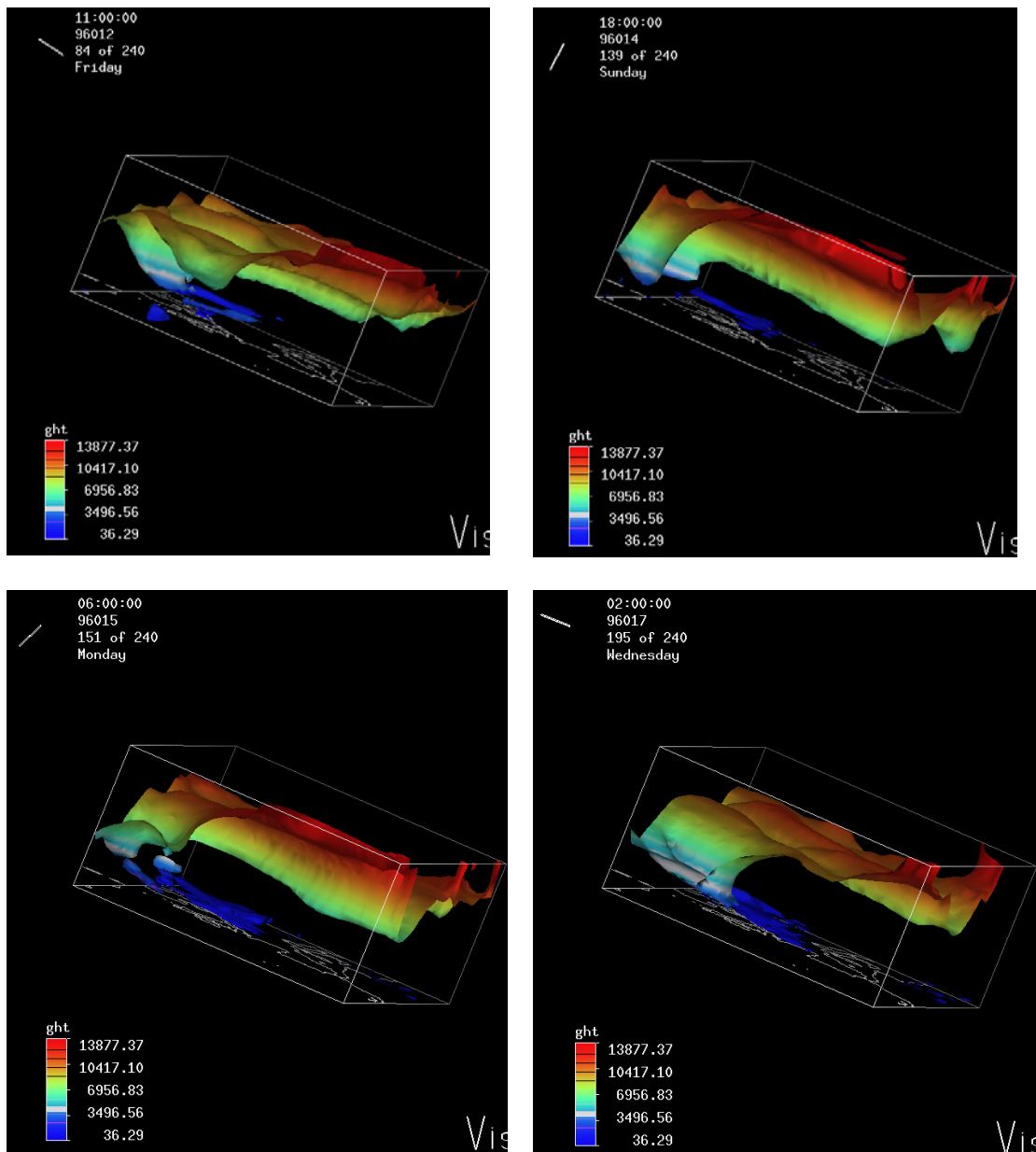


Figura 5.9: Afundamentos da tropopausa dinâmica sobre o Atlântico Norte em 12, 14, 15 e 17 de Janeiro de 1996, às 11H00, 18H00, 06H00 e 02H00 UTC, respectivamente.

A forte actividade da tropopausa detectada, tanto pela análise dos mapas de bolhas e de tropopausa construídos a partir dos dados de reanálise do ECMWF como pela modelação numérica, tem associada uma variação positiva da coluna total de ozono, como se pode observar na Figura 5.10. Ou seja, nos dias em que a actividade da tropopausa é elevada há valores mais elevados da coluna total de ozono ao largo da Península Ibérica, sobretudo nos dias 9 e 13 de Janeiro de 1996.

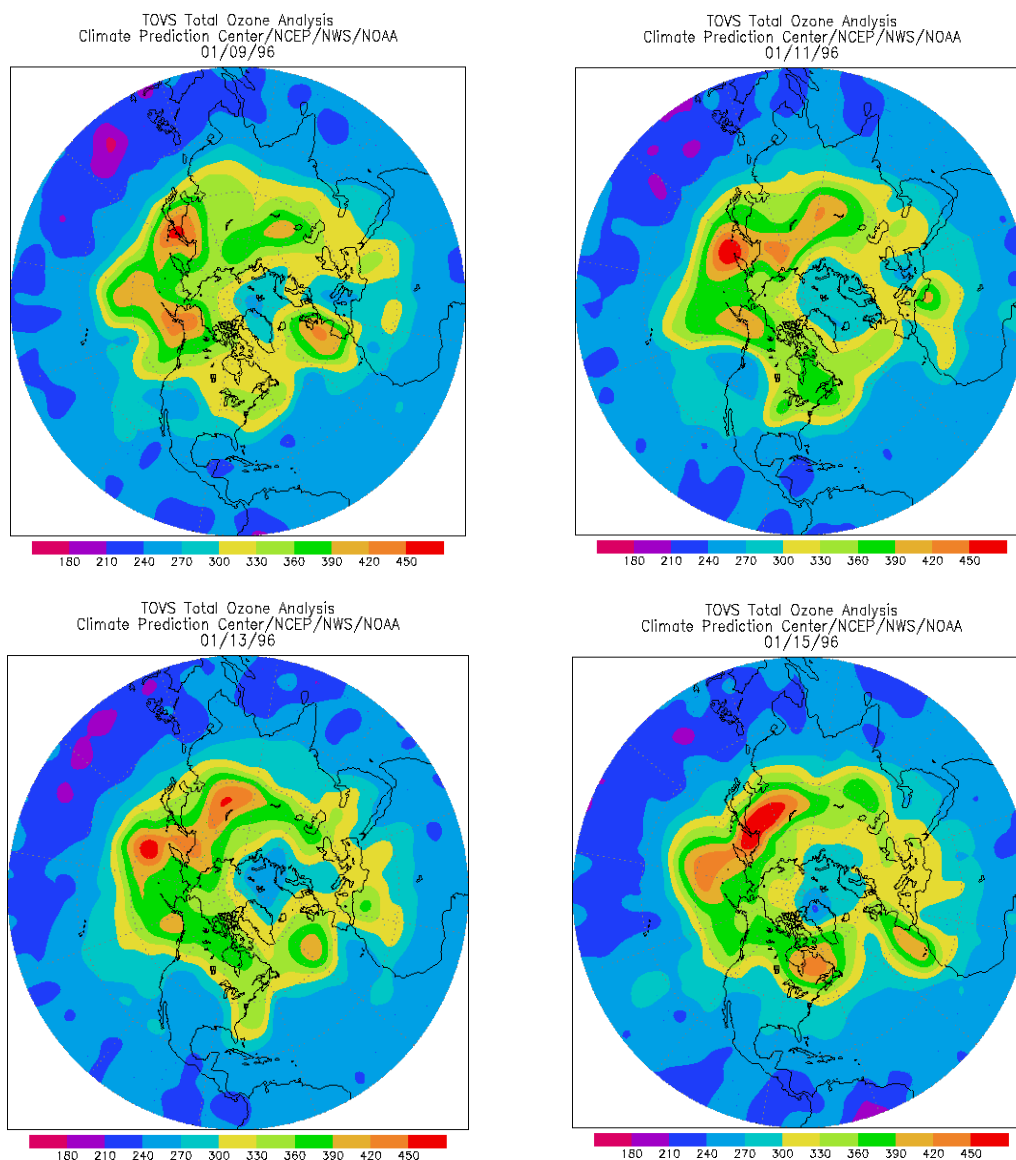


Figura 5.10: Coluna total de ozono medida sobre o Hemisfério Norte nos dia 9, 11, 13 e 15 de Janeiro de 1996 (URL 19).

As retrotrajectórias de partículas foram também calculadas através do programa HYSPLIT (URL 20) e os resultados das posições obtidos foram representados tridimensionalmente para facilitar a visualização da trajectória de partículas e as características das massas de ar por onde estas viajaram. Para este episódio de ozono calcularam-se retrotrajectórias com o seu final em Coimbra (40,2°N; 8,5 °W) e que chegam a diferentes altitudes, especificamente a 26 metros (altura da estação meteorológica), 500 e 1000 m. Considerou-se 1000 m uma altitude razoável para o desenvolvimento de uma possível camada de mistura às 12 horas sobre a região de Coimbra, representando o topo desta eventual camada.

Pela observação da Figura 5.11 qualquer uma das partículas esteve sob a acção de uma massa de ar pobre em humidade relativa, contudo as partículas que têm a sua origem no norte de África fazem o seu percurso a baixas pressões enquanto que a partícula que atravessa o Oceano Atlântico inicia o seu trajecto a níveis de pressão superiores aos 650 hPa, indicando uma maior possibilidade de enriquecimento da troposfera por ar estratosférico.

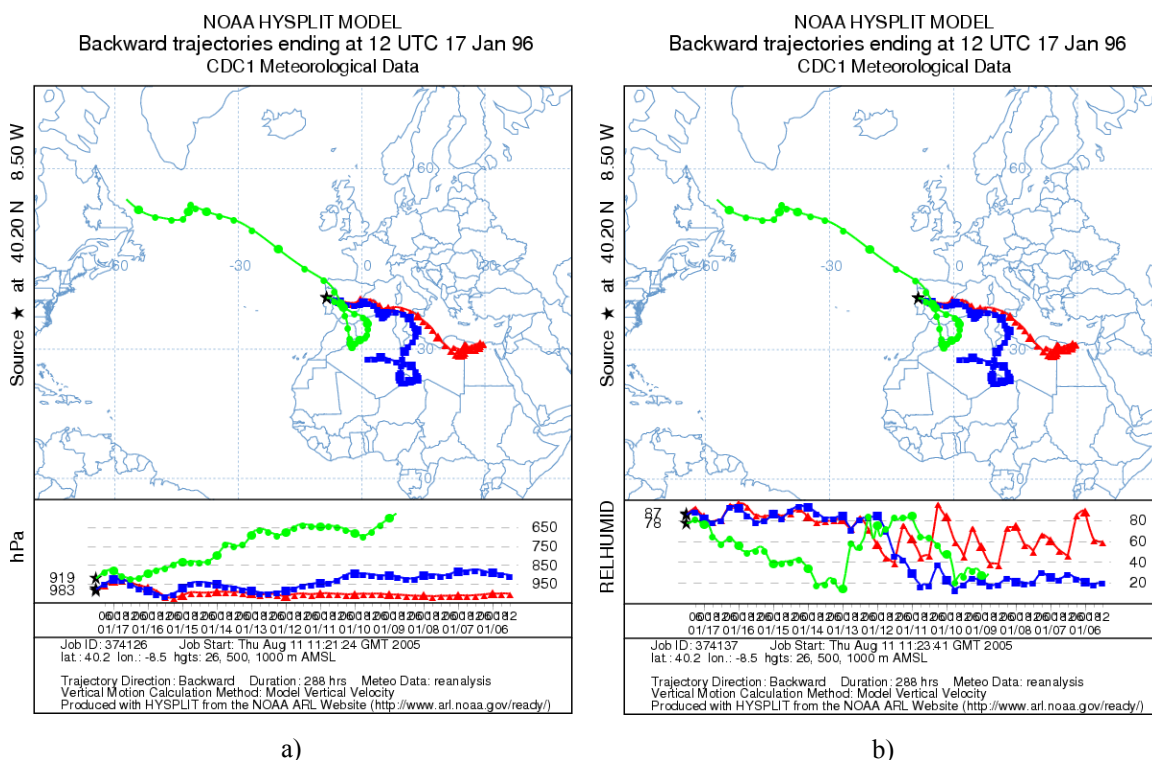


Figura 5.11: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam ao ponto de latitude/longitude (40,2°N ; 8,5°W). a) valores de pressão durante do trajecto; b) valores de humidade relativa durante o trajecto.

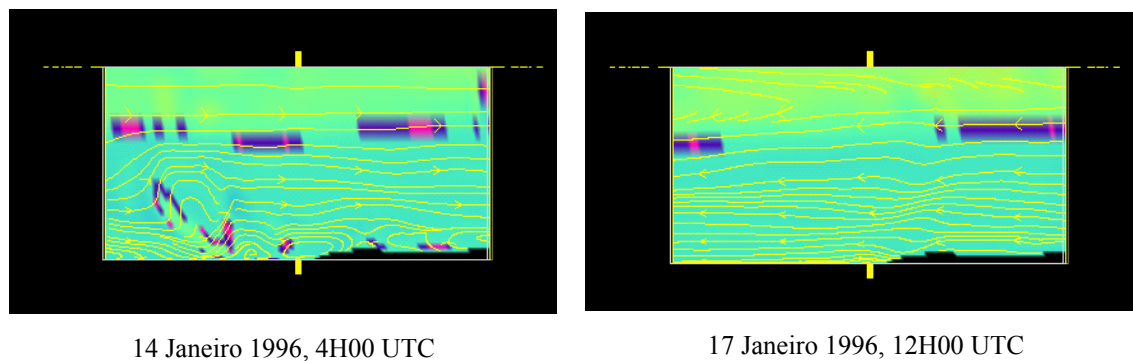


Figura 5.12: Linhas de corrente e UPV num plano vertical sobre o domínio 3 à latitude de 40,16 ° N, visto de Sul.

A evolução das linhas de corrente ajuda a visualizar o percurso de partículas calculadas para este período. Na Figura 5.12, no dia 14 de Janeiro às 4H00 UTC as linhas de corrente são de Oeste aos níveis médios altos, entre a superfície e a troposfera média a linearidade das linhas de corrente é quebrada por movimentos verticais de grande profundidade e pela influência da superfície no escoamento horizontal. No dia 17 observa-se uma grande estabilidade da atmosfera, as linhas de corrente provêm de Este desde a superfície até dois terços do limite da atmosfera considerada na simulação realizada. A cor lilás está associada a valores de vorticidade potencial isentrópica entre os 1,5 a 2,5 UPV, indicando o rosa valores à volta de 2,0 UPV. Como se pode observar, existe um massa de ar com características dinâmicas de elevada vorticidade potencial entre a superfície e a troposfera média ao largo da costa portuguesa, à latitude da região centro.

Para se obter a concentração de ozono em Coimbra por eventual produção fotoquímica, aplicou-se o modelo fotoquímico CAMx, considerando os campos meteorológicos resultantes do modelo MM5. A técnica de *nesting* foi também seleccionada no modelo fotoquímico para o cálculo das concentrações de ozono durante o período de simulação. Para este modelo consideraram-se apenas dois domínios, um de resolução de 30 km x 30 km abrangendo toda a Península Ibérica, e um domínio de maior resolução, 10 km x 10 km, considerando todo o território nacional e a parte fronteiriça do território espanhol. As emissões em área foram calculadas sobre os domínios em questão, de acordo com a resolução de cada um deles, tal como descrito em § 3.3. Os resultados obtidos em Coimbra, em ambos os domínios, encontram-se representados na Figura 5.13. Pela sua observação pode-se concluir que a malha de maior resolução ajuda a resolver melhor os mínimos de ozono, sobretudo até ao dia 15 de Janeiro. Os dias 16, 17 e 18 de Janeiro apresentam os valores de concentração de ozono simulado de maior amplitude, não atingindo os $90 \mu\text{g.m}^{-3}$. Este aumento está relacionado provavelmente com o aumento de radiação solar nesses dias, pois coincide com a fraca nebulosidade sentida nesse período. Contudo, este aumento de radiação solar não é suficiente para a que a produção fotoquímica de ozono justifique os valores medidos e que se encontram na Tabela 5.1.

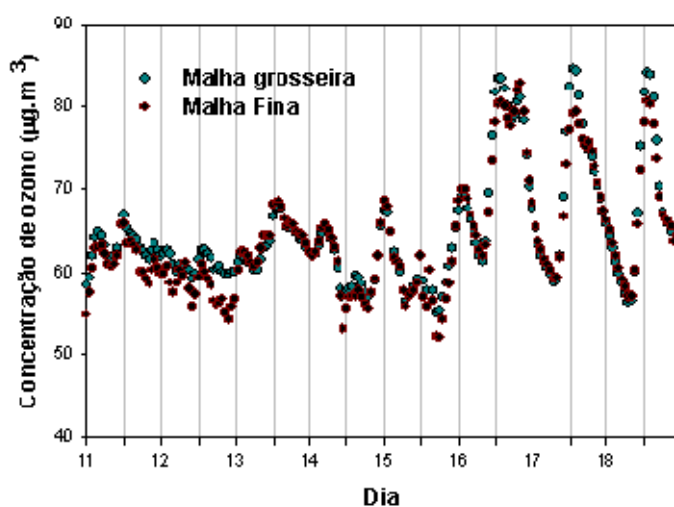


Figura 5.13: Evolução das concentrações de ozono em superfície em Coimbra simuladas para o período entre 11 e 18 de Janeiro de 1996.

A análise deste evento de Inverno ocorrido em Coimbra demonstrou ser bastante complexa, apesar de se tentar isolar dias de ocorrência de episódios de ozono superiores a $180 \mu\text{g.m}^{-3}$. Tal como se mostrou na Tabela 5.1, os valores de ozono registados na estação de qualidade do ar nesta cidade foram superiores aos $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ entre os dias 5 e 21 do mês de Janeiro de 1996, à excepção do dia 11. A análise de retrotrajectórias de todo este período não foi realizada devido ao critério imposto para estudo de um episódio meteorológico associado a um episódio fotoquímico. Contudo considerou-se ser útil a observação das retrotrajectórias que chegam a Coimbra no dia 5, bem como as que chegam a Coimbra, Monte Velho e Monte Chãos, estações que apresentam concentrações de ozono superiores a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ no dia 9 de Janeiro.

Pela análise das Figuras 5.14 e 5.15 observa-se que as partículas que chegam às três estações de qualidade do ar previamente identificadas com concentrações de ozono superiores a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ parecem pertencer à mesma massa de ar, já que as partículas que terminam as suas trajectórias aos diferentes níveis verticais atravessam zonas com humidade relativa semelhante, três dias antes de atingirem a costa portuguesa. Contudo, são as trajectórias que chegam ao nível dos 1000 m, em todas as localidades, a cor verde, que atravessaram regiões de massas de ar com humidade relativas inferiores a 20 %, entre o dia 2 e 3 de Janeiro.

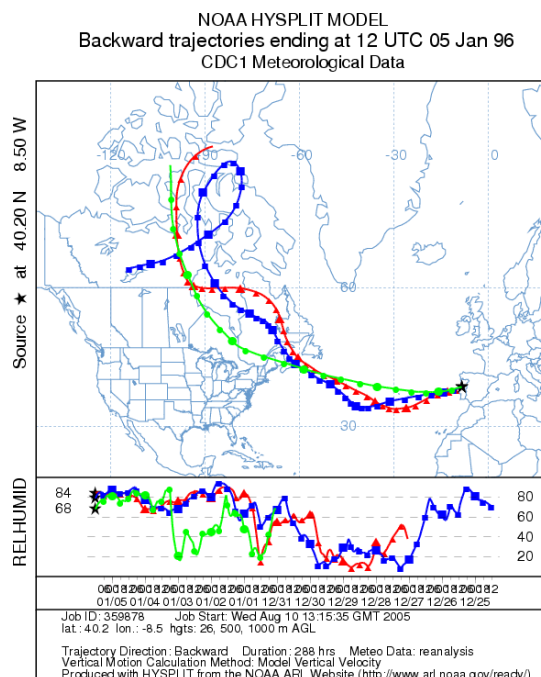
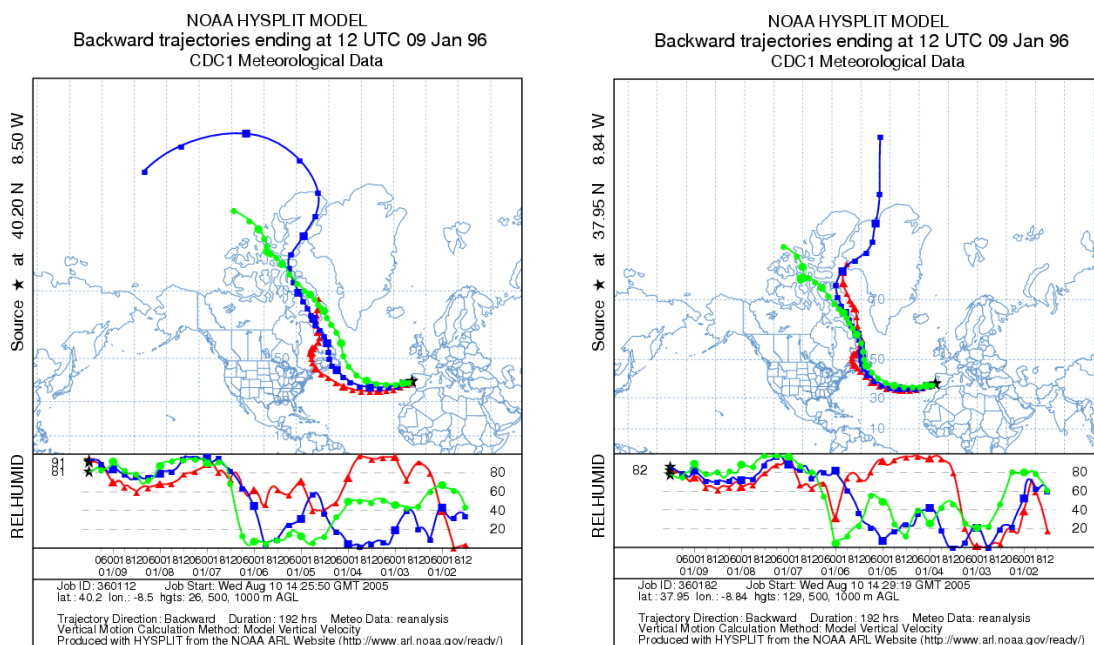
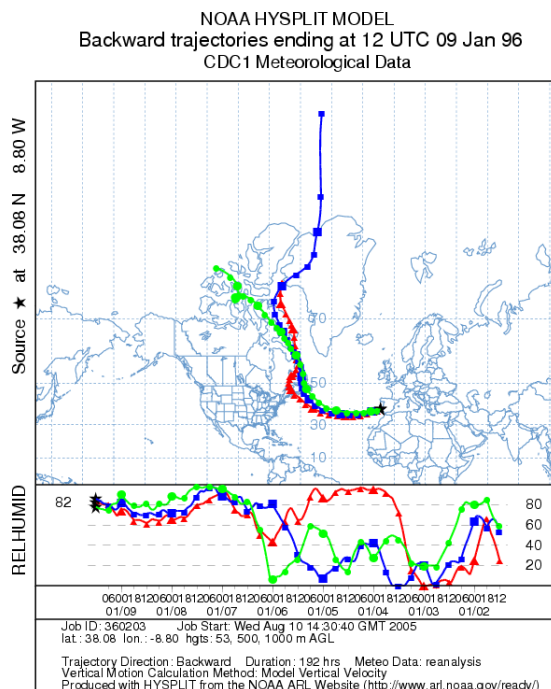


Figura 5.14: Retrotrajectórias de partículas obtidas pelo modelo HYSPLIT que chegam ao ponto de latitude/longitude (40,2°N;8,5°W) - Coimbra - no dia 5 de Janeiro de 1996, às 12H00 UTC. Valores de humidade relativa durante o trajecto.

Embora não se tivesse feito uma análise exaustiva de todo o período considerado, parece haver indicações de que a forte actividade da tropopausa detectada previamente no início do mês de Janeiro sobre o Atlântico esteja relacionada com intrusões de massa de ar



b) Monte Chãos



c) Monte Velho

5.2.2 Simulação e análise do episódio 2: Coimbra, Dezembro de 1997

Mais uma vez, a cidade de Coimbra registou uma ultrapassagem ao limiar de alerta à população no dia 27 de Dezembro de 1997, com $237 \mu\text{g.m}^{-3}$ às 3H00 UTC. Contudo, neste caso, a aplicação do filtro de limiar $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ mostra apenas registo de um valor de $135 \mu\text{g.m}^{-3}$ três dias antes, também em Coimbra (Figura 5.16).

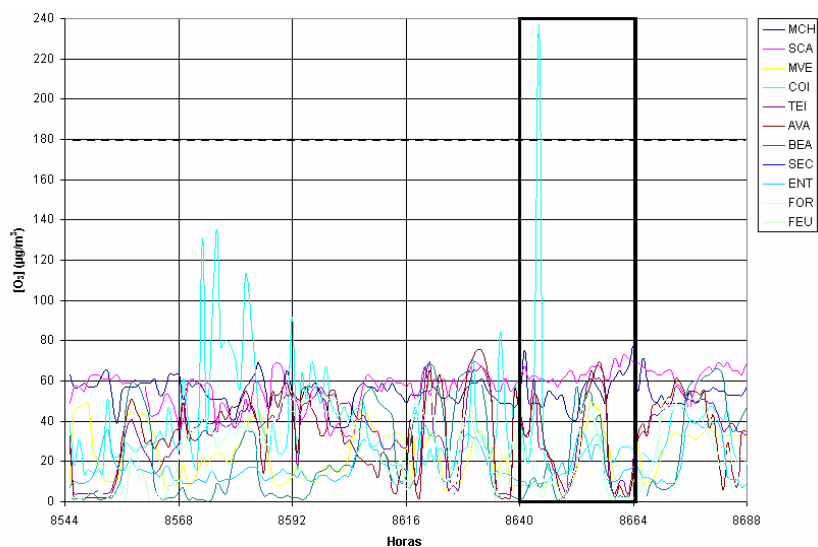


Figura 5.16: Concentração de ozono em medidas na rede de qualidade do ar, entre 23 e 28 de Dezembro de 1997.

O episódio meteorológico para análise prévia foi definido entre o dia 15 e o dia 29 de Dezembro de 1997. Neste período, e segundo Leitão e Moreira (2004), o campo de pressão sobre o Atlântico é depressionário, com vários núcleos que evoluem entre o Continente Americano e a Europa desde o dia 15 até ao dia 27, o que conduz à localização do anticiclone dos Açores muito a sul, oscilando entre o sudoeste dos Açores e a Península Ibérica. No Atlântico noroeste encontra-se uma massa de ar ártico. Este padrão está associado a uma forte actividade ciclogénica e da tropopausa.

Durante os 15 dias considerados para o episódio meteorológico dá-se a passagem de um sistema frontal sobre o território do Continente entre o dia 21 e o dia 22 e posteriormente instala-se um intenso anticiclone, em crista, sobre a Península Ibérica condicionando um fluxo de sudoeste, até à passagem de uma frente oclusa de fraca actividade no dia 26. A temperatura máxima registada no dia 26 de Dezembro foi de $13,4^{\circ}\text{C}$. Este valor parecer ser muito baixo para produção fotoquímica de ozono na camada limite durante o dia e posterior armazenamento na camada residual. Ou seja, neste caso particular, o reaparecimento e registo das concentrações elevadas de ozono durante a madrugada não se justifica por este processo.

Do estudo detalhado da sobreposição das retrotrajectórias com o mapa da tropopausa e com o mapa de “bolhas” de ar estratosférico resultam as seguintes situações de interesse (Borrego *et al.*, 2005b):

- (i) Entre o dia 19 às 12H00 UTC e o dia 20 às 00H00 UTC, as retrotrajectórias atravessam o Norte do Canadá e as partículas estão perto de uma anomalia da tropopausa que atinge níveis perto dos 800 hPa.
- (ii) No dia 21 entre as 00H00 e 12H00 UTC a partícula encontra-se entre a Gronelândia e o Canadá a níveis entre os 735 e 920 hPa, enquanto que no mapa de “bolhas” de ar estratosférico, identifica-se a isolinha de 1,5 UVP ao nível de 850 hPa nesta região. A análise das secções verticais da tropopausa mostra que a partícula se encontra numa região com “ruído de terra”, ou seja com níveis de UPV elevados junto ao solo devido ao forte arrefecimento da camada limite.
- (iii) No documento redigido por Leitão e Moreira (2004) sugere-se outra hipótese de intrusão de ar estratosférico sobre o Atlântico entre o dia 22 às 18H00 UTC e o dia 24 às 12H00 UTC, numa região em que há intensa actividade da tropopausa. A sobreposição das retrotrajectórias com o mapa da tropopausa mostrou que esta hipótese não teria interesse como bolsa de ar a enriquecer a troposfera média. No entanto, como se irá verificar, os resultados de modelação indiciam que esta hipótese não deverá ser desprezada.

A observação dos compósitos derivados da passagem do satélite TOMS permite verificar a ocorrência de valores de coluna total de ozono elevados, entre a costa Este da América do Norte e a Europa nos dias 18 e 24 de Dezembro de 1997 (Figura 5.17), que deverão estar relacionados com os sistemas depressionários e com a forte actividade da tropopausa associada, detectados previamente na análise do episódio meteorológico.

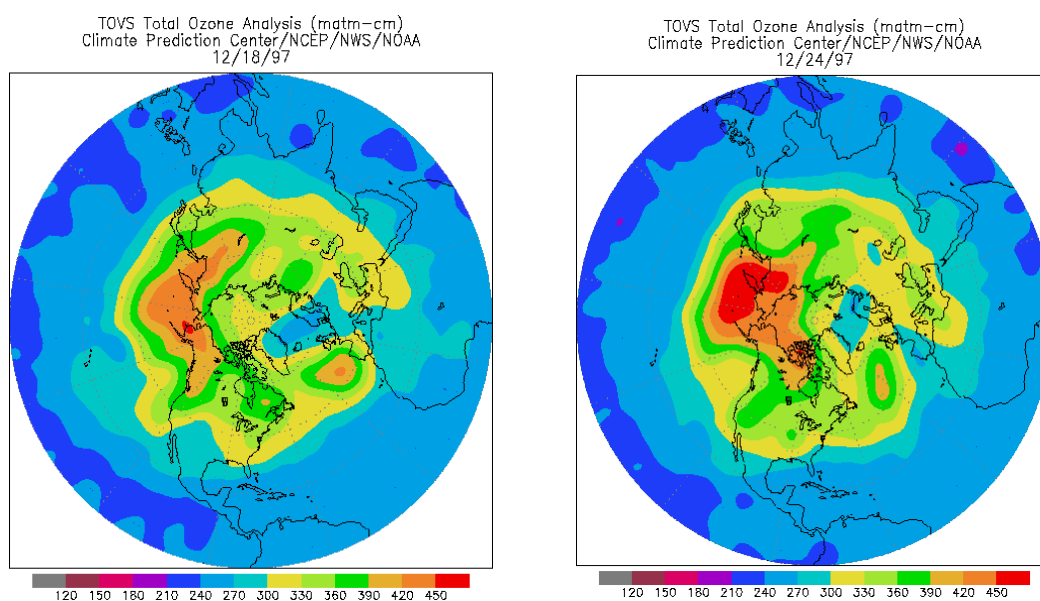


Figura 5.17: Coluna total de ozono medida sobre o Hemisfério Norte nos dias 18 e 24 de Dezembro de 1997 (URL 19).

A simulação deste episódio meteorológico incluiu o período de 18 a 30 de Dezembro. A análise das superfícies de vorticidade potencial isentrópica mostra menor actividade vertical da atmosfera comparativamente com o evento ocorrido em Janeiro de 1996. As superfícies isentrópicas de 1,5 UPV situam-se em quase todo o período de simulação nas camadas médias altas da atmosfera, à excepção de um afundamento verificado entre os dias 23 e 26 de Dezembro de 1997 sobre o Atlântico (Figura 5.18). Este evento detectado em simulação é aquele que se encontra temporalmente mais próximo da hipótese rejeitada na análise feita com base na trajectória de partículas e perfis verticais de vorticidade potencial isentrópica, feitas a partir dos dados de reanálise do ECMF e disponíveis a cada seis horas, entre os dias 22 e 24 de Janeiro 1997 sobre o Oceano Atlântico.

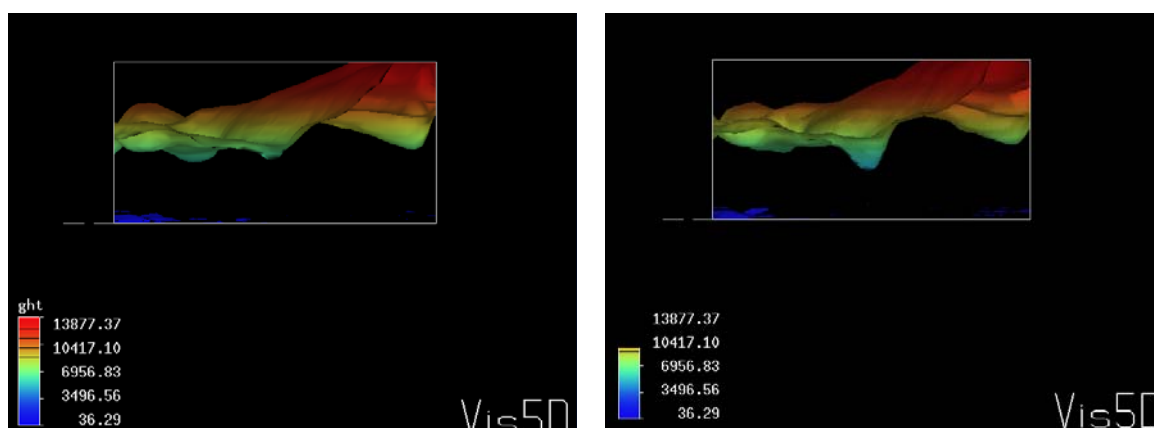


Figura 5.18: Instantes do início (23 de Dezembro, às 20H00 UTC) e máximo (24 de Dezembro, às 00H00 UTC) do afundamento detectado no período de simulação.

Contudo, vem referido na bibliografia (Vaughan *et al.*, 2001) que a massa de ar com características estratosféricas que entra na troposfera pode chegar perto da camada limite superficial desde que as camadas de temperatura potencial, sobre as quais é advectada, apresentem um declive acentuado. Neste sentido, analisaram-se as intersecções das superfícies de temperatura potencial de 305 K e as de vorticidade potencial isentrópica de 1,5 UPV no domínio 1, no instante em que o afundamento se revelou de maior profundidade.

Na Figura 5.19 é visível a inclinação da isentrópica de 305 K, localizando-se a maiores altitudes na parte Norte do domínio e menores na parte Sul, e a porção do afundamento de parte da baixa estratosfera que permanece sob ela. A massa de ar estratosférico que se encontra condicionada parece viajar com velocidade elevada sobre o Atlântico (Figura 5.20).

As retrotrajectórias calculadas para este evento pelo programa HYSPLIT (URL 20) têm o seu início, tal como as calculadas por Leitão e Moreira (2004) em Coimbra à latitude de 40,2° N; 8,5 °W, em três altitudes diferentes: 26, 500 e 1000 metros acima do nível do mar. As três trajectórias calculadas apresentam um trajecto horizontal muito próximo nos dias 25 e 26 de Dezembro (Figura 5.20). As duas trajectórias que se apresentam mais próximas da superfície em Coimbra no dia 27 de Dezembro iniciam o seu percurso no dia 19 sobre o Canadá, descrevendo um movimento vertical muito próximo ao longo de todo o período.

As partículas associadas a estas trajectórias viajam por regiões que apresentam características semelhantes de humidade relativa ao longo do tempo. Estas regiões enriquecem paulatinamente o seu valor neste parâmetro à medida que as partículas se aproximam do solo. Tal não acontece com a partícula que chega ao ponto considerado aos 1000 m (cerca dos 933 hPa). Esta partícula surge na atmosfera apenas no dia 23 de Dezembro, às 7H00 UTC, aos 592,8 hPa com uma humidade relativa de 45,2 %. O valor de humidade relativa atinge um mínimo, próximo de zero, no dia 24 entre as 12 e as 13H00 UTC, ao nível de pressão de 802,6 hPa indicando massas de ar com possibilidade de génese na estratosfera. Nas cerca de 30 horas seguintes a partícula passa por regiões onde o teor de humidade relativa sobe para valores de 78 %, atingindo os 1000 m no dia 27 de Dezembro com cerca de 87,5 %. A Figura 5.20 tem assinalada a região onde a partícula, cuja trajectória está representada a verde, passa por massas de ar com reduzido teor de humidade, a níveis de altitude de cerca de 1800 m.

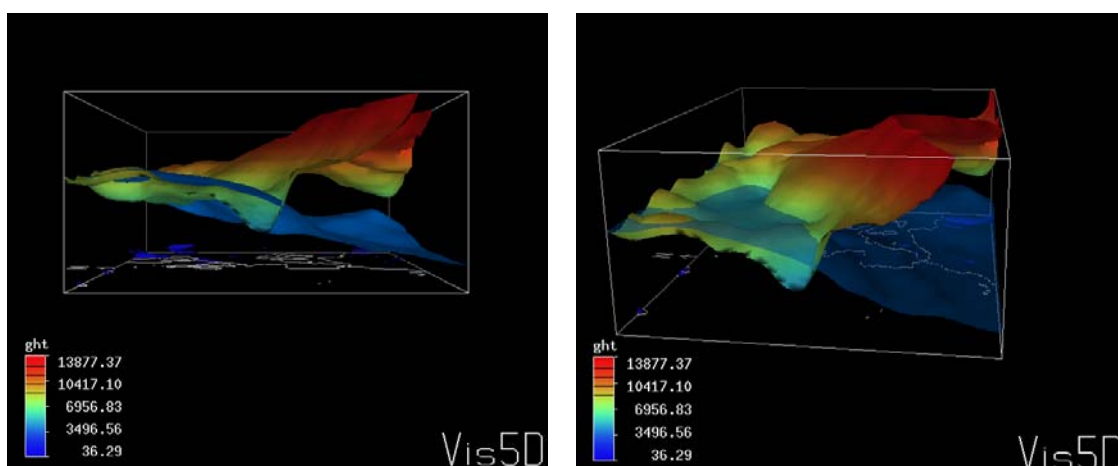


Figura 5.19: Vista de Oeste, em duas perspectivas, da intersecção das superfícies isentrópica de 305 K e da isosuperfície de vorticidade potencial isentrópica de 1,5 UPV às 00H00 UTC de 24 de Dezembro de 1997.

A análise da Figura 5.20 pode ser complementada com a representação tridimensional observada na Figura 5.21. A altura a que a partícula se encontra em cada ponto de longitude latitude mostra a existência de declives acentuados sobre o Atlântico estes, por sua vez, estão associados aos declives das superfícies isentrópicas presentes na atmosfera e de que se deu conta também na Figura 5.19.

Os valores obtidos com as retrotrajectórias calculadas parecem dar importância ao afundamento da superfície isentrópica de 1,5 UPV observado a partir dos resultados do modelo MM5 e, portanto, à hipótese de intrusão de ar estratosférico na troposfera média que havia sido rejeitada pela análise conjunta do mapa de bolhas, anomalias da tropopausa e retrotrajectórias. A região identificada na Figura 5.20 está relacionada com o maior desnível vertical sofrido pela partícula no seu movimento, cerca de 2000 m.



b'



Gráfico 1: Evolução da produção de leite em litros por vaca leiteira, em função da idade em meses, para as três trajetórias de produção. O gráfico mostra três linhas: Trajetória 1 (preta), Trajetória 2 (verde) e Trajetória 3 (vermelha). A produção aumenta com a idade, com a Trajetória 1 atingindo o maior valor (acima de 4000 litros) e a Trajetória 3 o menor (abaixo de 4000 litros).

5.2.3 Simulação e análise do episódio 3: Madrid, 29 de Abril 2000

O episódio de ozono ocorrido em Madrid na madrugada de 28 para 29 de Abril de 2000 foi registado em pelo menos sete estações da rede de controlo da qualidade do ar da Comunidade de Madrid (Figura 5.22). O registo das concentrações de ozono tem uma orientação aproximadamente Nordeste-Sudoeste, tendo-se registado a primeira concentração elevada dessa noite em Torrejon, com valores superiores a $140 \mu\text{g.m}^{-3}$, às 23H00 UTC do dia 28 de Abril. Às 00H00 UTC do dia 29 de Abril registaram-se concentrações de $425 \mu\text{g.m}^{-3}$, aproximadamente, em Coslada; em Gestafe, Fuenlabrada, Alcorcon, Leganés registaram-se vários picos nocturnos, com concentrações que atingiram cerca de $1150 \mu\text{g.m}^{-3}$; e, por último, Móstoles às 8 da manhã com valores de concentração de ozono de $220 \mu\text{g.m}^{-3}$ (ver no Anexo III a evolução das concentrações de ozono das estações mencionadas).

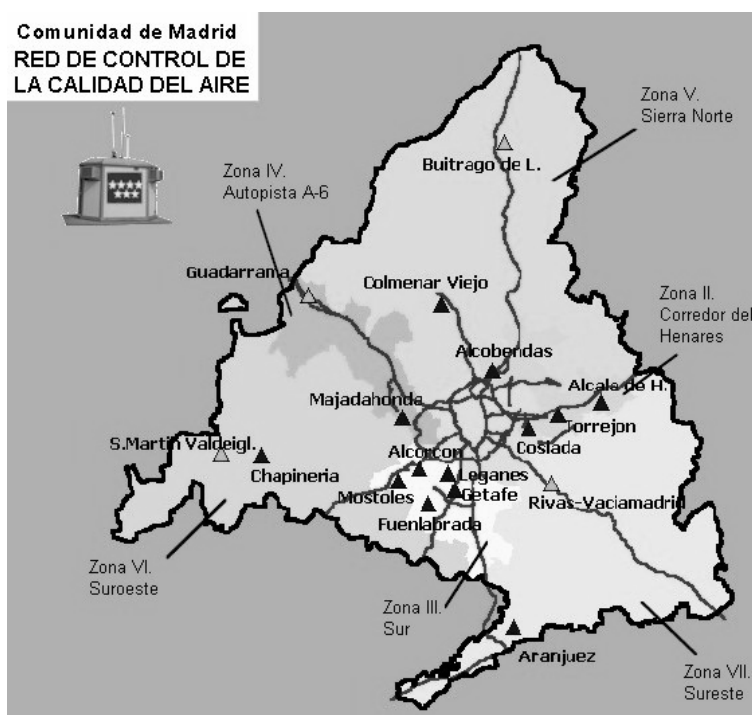


Figura 5.22: Estações de qualidade do ar da Rede de Monitorização da Comunidade de Madrid, Espanha (URL 21).

Neste episódio seguiram-se duas metodologias de análise: construção de mapas verticais com informação de radiossondagens e visualização de resultados relevantes da aplicação do modelo MM5 ao período do episódio meteorológico definido entre o dia 21 de Abril e o dia 1 de Maio de 2000. Nos mapas referidos (Figura 5.24 a Figura 5.28) figuram as isotacas, isentrópicas e isolinhas de humidade relativa segundo duas orientações, representadas na Figura 5.23 com os detalhes de localização na Tabela 5.3.

- Norte-Sul, com as radiossondagens realizadas em Camborn (Reino Unido), Brest/Guipavas (França), Santander, Madrid/Barajas e Murcia, estas três em território espanhol;
- Oeste-Este, com as radiossondagens realizadas em Lisboa (Portugal), Madrid/Barajas, Ilhas Baleares (Espanha), e em Cagliari, Sardenha (Itália).

A estação meteorológica mais elevada é a de Madrid, contudo o seu valor de altitude, 582 m, é baixo quando se compara com estações onde se analisam séries longas para identificação de intrusões de ozono estratosférico na baixa troposfera (Stohl *et al.*, 2000; Bonasoni *et al.*, 2000).

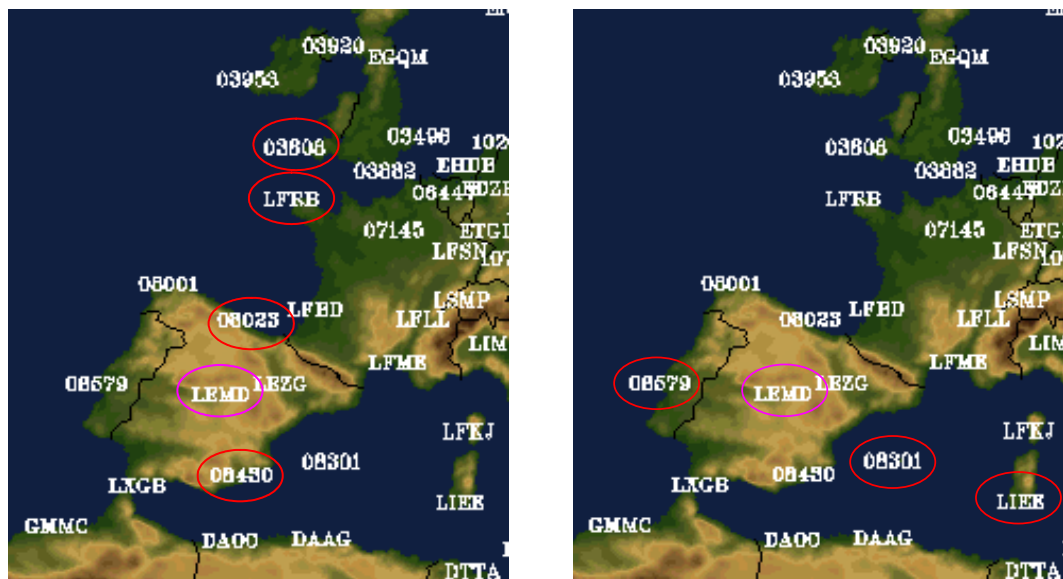


Figura 5.23: Localização dos lançamentos de radiossondagens (URL 22).

Tabela 5.3: Coordenadas geodésicas das estações de radiossondagens.

Estação meteorológica	Código da OMM	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Camborn (UK)	3808	50,37	-5,53	88
Murcia (SP)	8430	38,00	-1,17	62
Santander (SP)	8023	43,47	-3,82	65
Brest (FR)	7110	48,45	-4,42	103
Lisboa (PT)	8579	38,77	9,13	105
Madrid/Barajas (SP)	8221	40,45	3,55	582
Baleares (SP)	8301	39,55	2,62	6
Cagliari (IT)	16560	39,25	9,05	1

Aos mapas verticais resultantes da interpolação das variáveis meteorológicas mais importantes nesta análise medidas em Camborn, Murcia, Santander, Brest e em Madrid/Barajas denominam-se cortes Norte-Sul (N-S) tal como o sugerido pelo alinhamento das estações, enquanto que os mapas resultantes da interpolação de valores de parâmetros meteorológicos adquiridos nas radiossondagens realizadas em Lisboa, Madrid/Barajas, Baleares e Cagliari/Sardanha se designam por cortes Oeste-Este (W-E).

Segundo Bithell *et al.* (2000), as intrusões de ar estratosférico podem ser observadas em perfis verticais medidos num determinado local se apresentarem valores elevados de estabilidade estática e baixo teor de humidade e valores elevados de ozono.

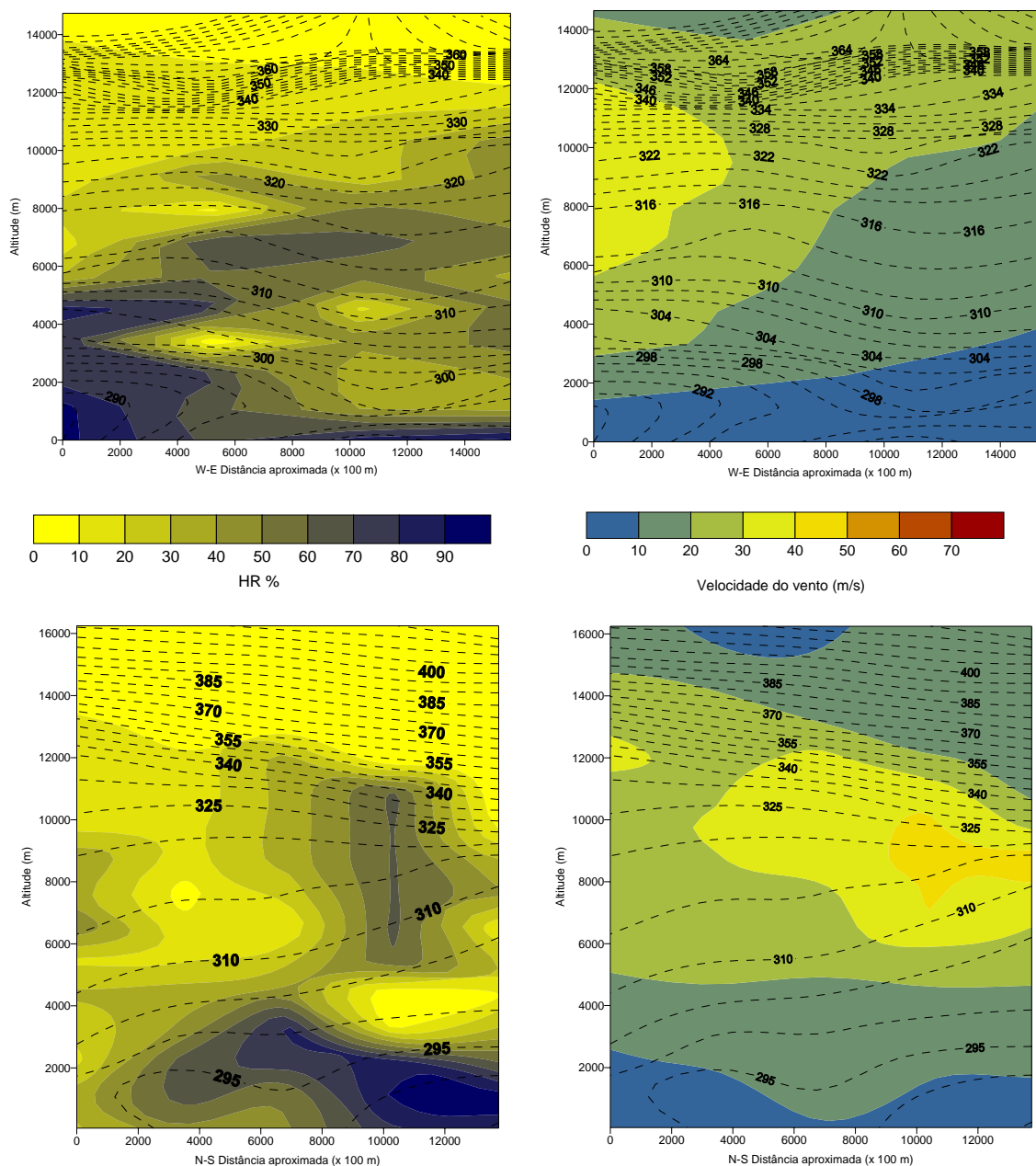


Figura 5.24: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 25 Abril 2000 às 12H00 UTC.

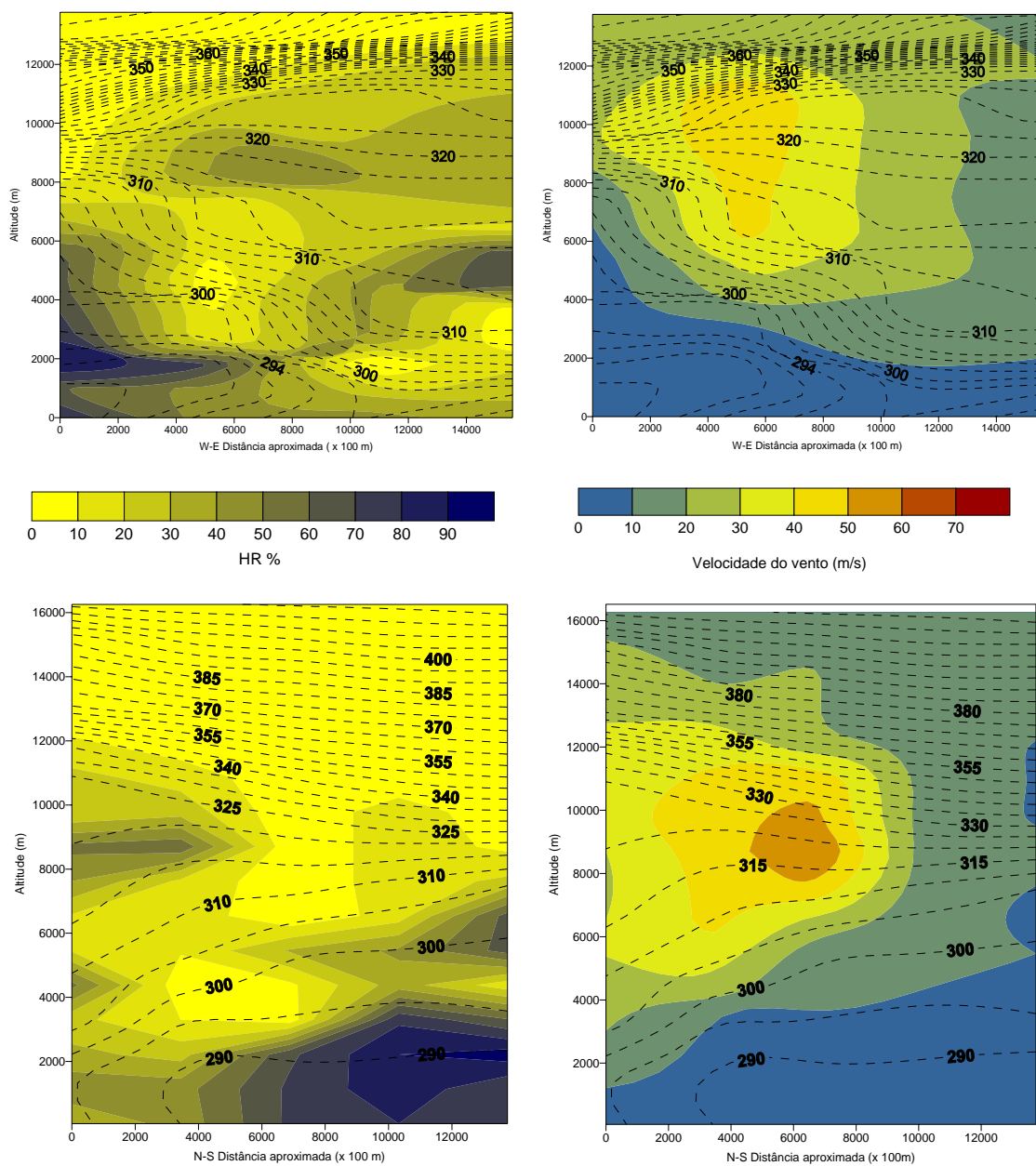


Figura 5.25: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 26 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.

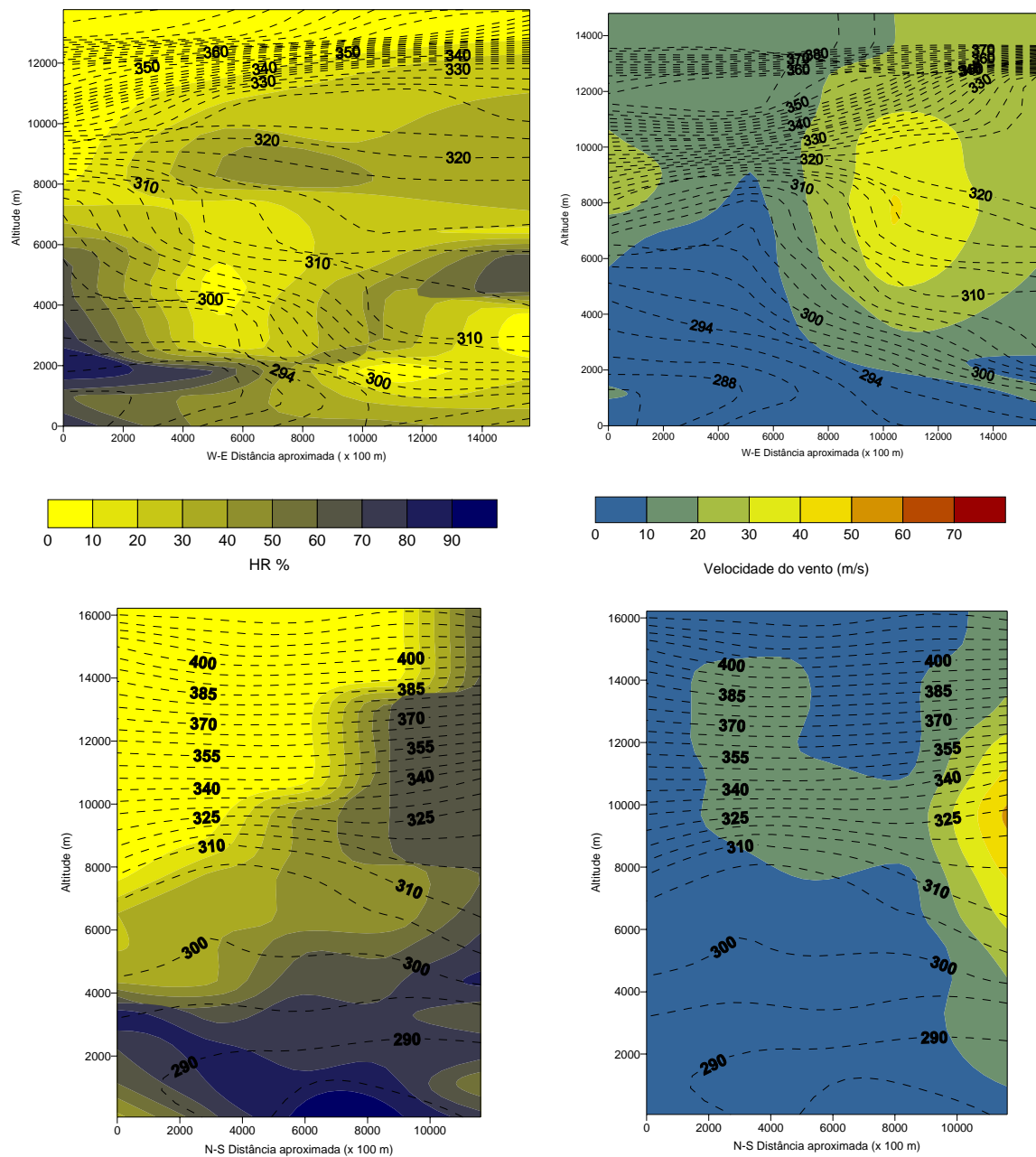


Figura 5.26: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 27 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.

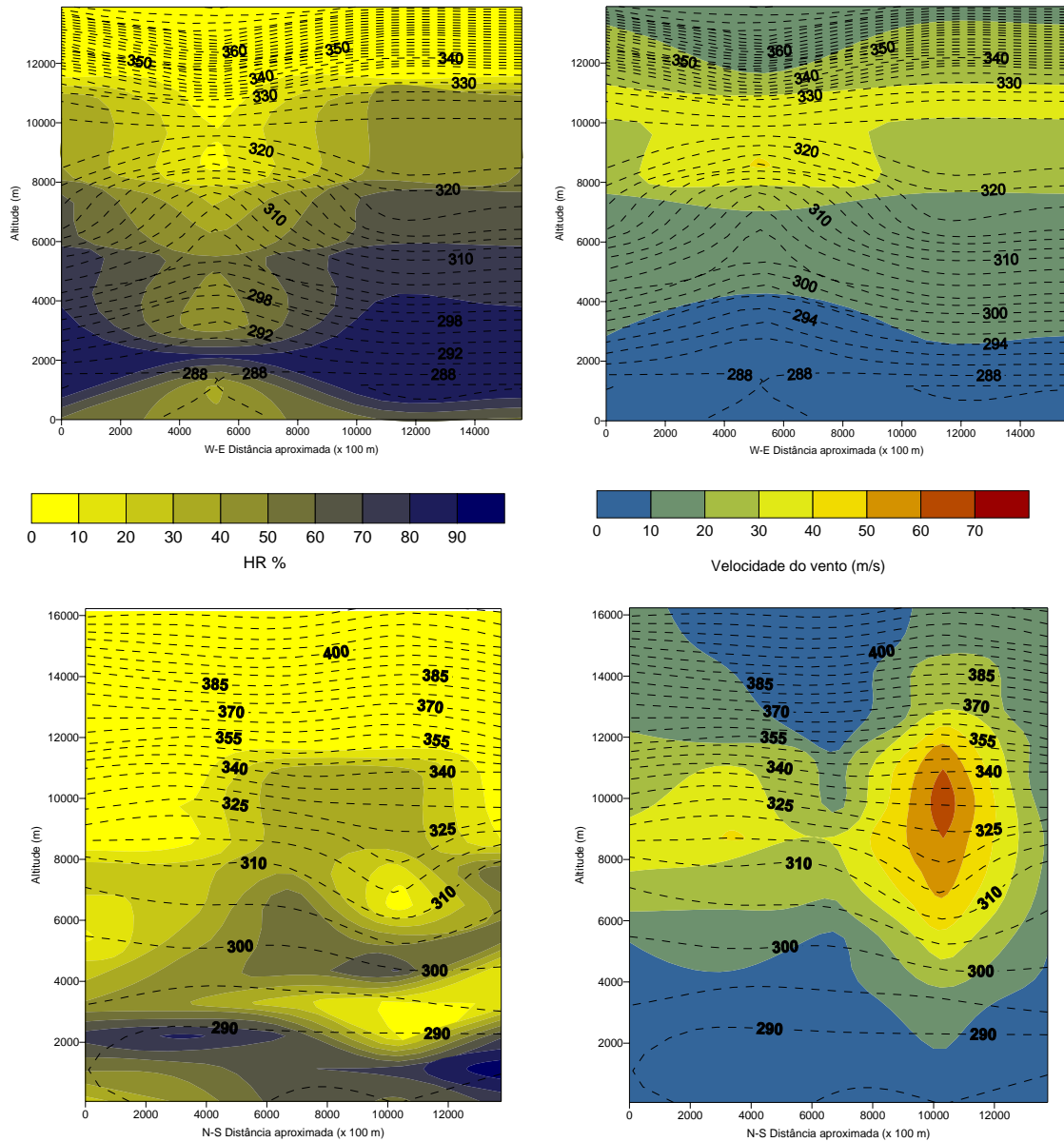


Figura 5.27: Mapas verticais de isentrópicas, isotacas e isohúmicas em 28 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.

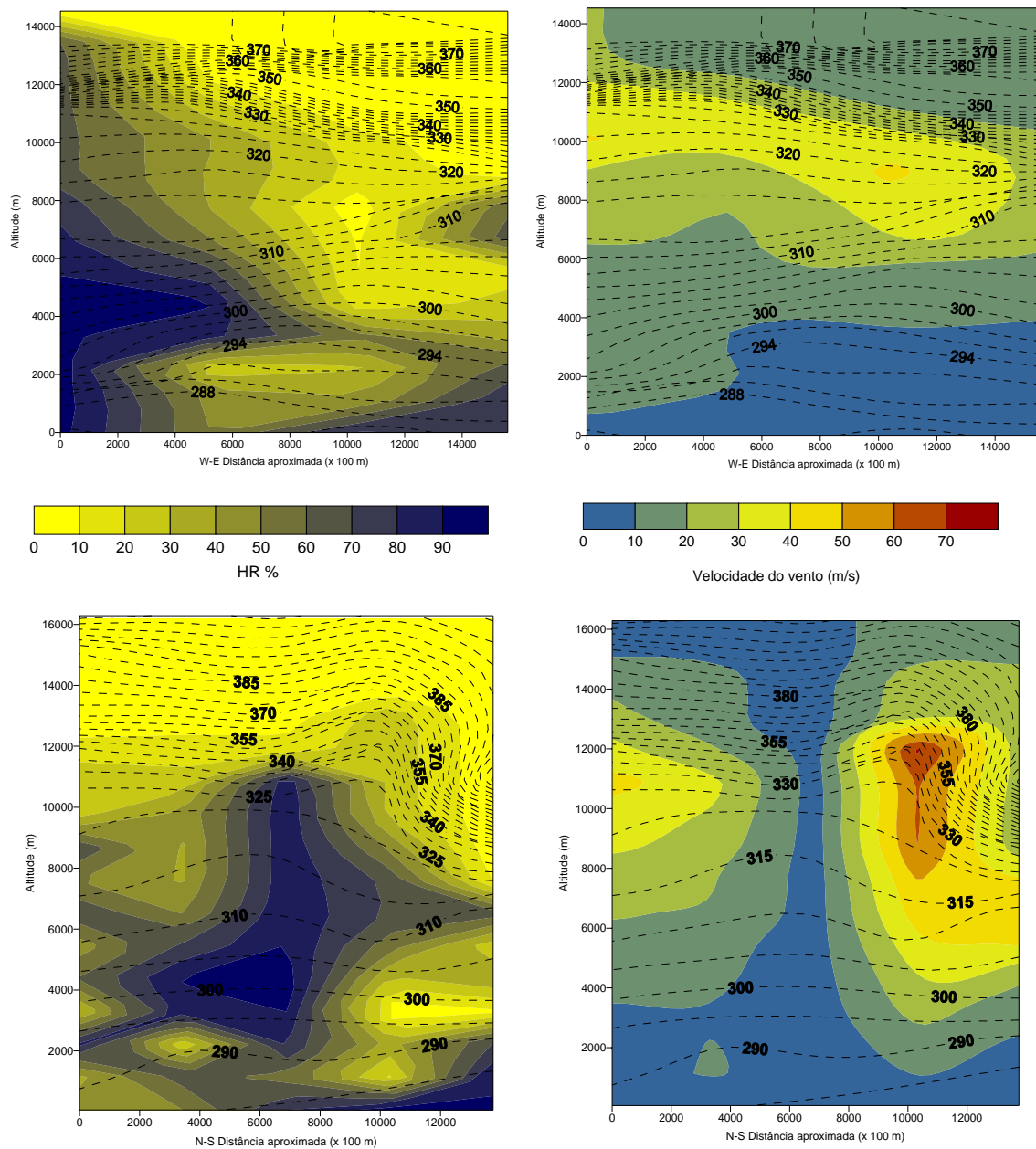


Figura 5.28: Mapas verticais de isentrópicos, isotacas e isohúmicos em 29 de Abril de 2000, às 00H00 UTC.

A análise dos cortes N-S (Figuras 5.24 a 5.28) mostram uma intensificação da corrente de jacto em Brest e Camborn (ver localização das estações na Figura 5.23). As isotacas mostram valores cada vez mais elevados até se atingirem um máximo da intensidade de vento de $71,5 \text{ m.s}^{-1}$ às 00H00 UTC do dia 29. Curiosamente, no dia 29 é possível verificar a existência de dois núcleos de elevada velocidade de vento a Norte e a Sul, ou seja em Brest e em Murcia. As zonas de maior velocidade de vento correspondem, a esta hora, a zonas da atmosfera com baixa humidade relativa, enquanto que as zonas de menor velocidade de vento estão caracterizadas com valores de humidade relativa elevados e que se estendem em altitude. É visível também a perturbação que a corrente de jacto introduz na estabilidade atmosférica e a anomalia que provocam nas isentrópicas entre Brest e Camborn.

De uma maneira geral, observa-se uma atmosfera com valores de humidade relativamente baixos. Contudo, no dia 25 de Abril de 2000 verifica-se a passagem de um sistema frontal sobre a Península Ibérica, o que se observa pela inclinação das isentrópicas e pelo aumento de humidade relativa na estação mais perto do Oceano Atlântico (Lisboa). Neste dia observa-se uma lâmina de ar seco entre os 3000 e os 4000 m. Esta lâmina parece fazer parte da bolsa de ar seco visível no mapa vertical da secção Norte-Sul, com valores de humidade inferiores a 20%, no mesmo instante. Aprecie-se a inclinação para Sul das isentrópicas que passam sobre esta bolsa de ar estratosférico.

Todavia, os mapas verticais com orientação Oeste-Este evidenciam também zonas de inclinação acentuada das isentrópicas. No dia 26 de Abril de 2000, às 12H00 UTC, a isentrópica de 298 K desce desde cerca de 4000 m, na estação de Lisboa, até à superfície, numa distância horizontal de 1000 km. Enquanto, por exemplo, a isentrópica de 310 K, desce desde os 8250 m até aos 3000 m, sobre a mesma distância horizontal. Entre estas duas isentrópicas é possível verificar a existência de duas bolsas de ar seco, abaixo dos 5000 m de altitude.

Entre os dias 25 e 29 de Abril a passagem da corrente de jacto é visível tanto nos mapas de corte Oeste-Este como nos de Norte-Sul, apresentando valores mais elevados nos cortes Norte-Sul no dia anterior e no próprio dia em que se registaram valores de concentração de ozono elevados em Madrid. Sobretudo, a observação das Figuras 5.25 e 5.26, dos dias 26 e 27 de Abril, conjuntamente com a análise de retrotrajectórias que figuram nas Figuras 5.29 e 5.30, permite verificar que o movimento de uma massa de origem estratosférica se poderia ter dado entre as isentrópicas inclinadas de 300 e 310 K até perto da superfície. No dia 28 é visível a junção de duas massas de ar com características de temperatura diferenciadas.

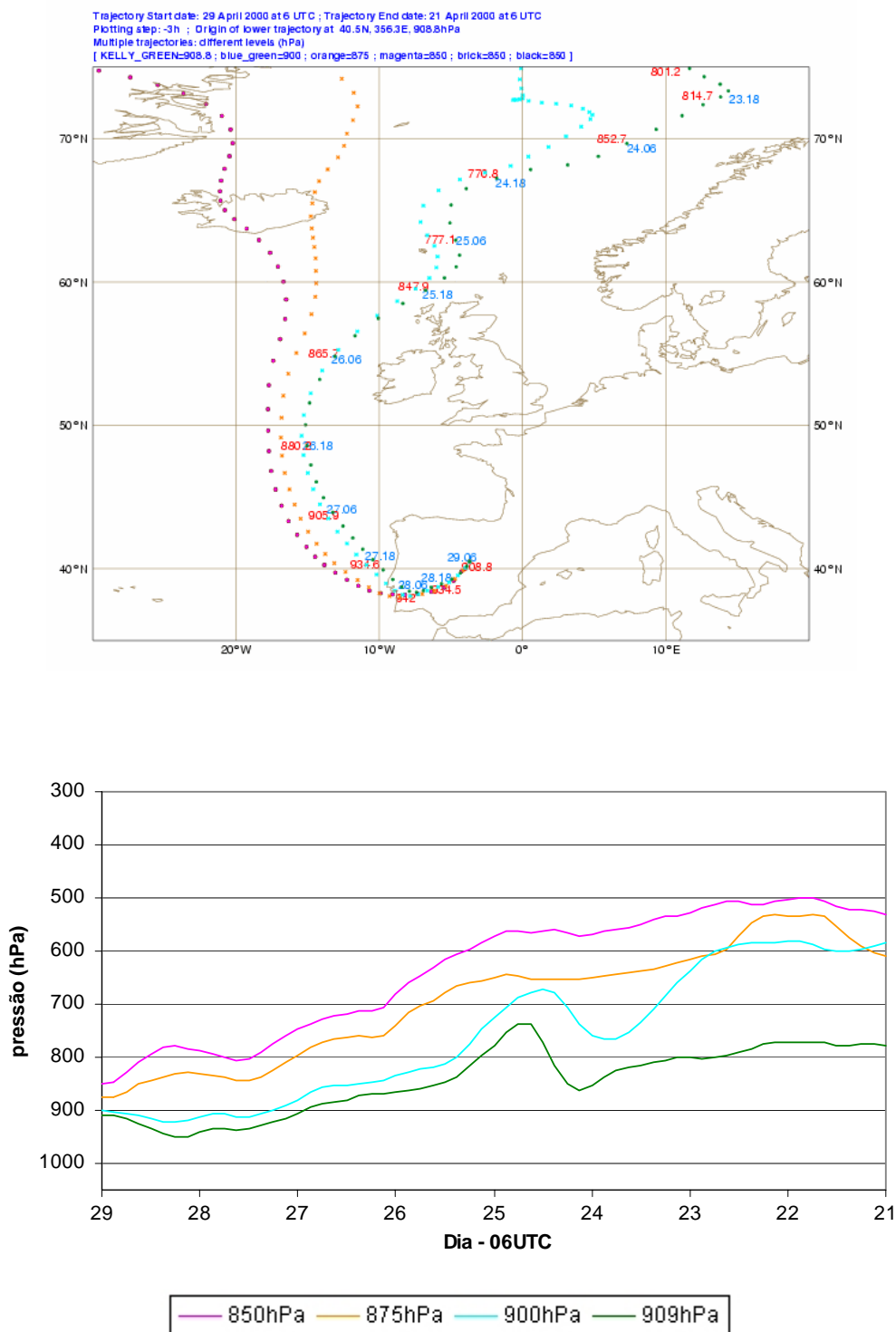


Figura 5.29: Retrotrajectórias das partículas, calculadas pelo KNMI, que chegam a Madrid (40.5°N 3.7°W) no dia 29 de Abril de 2000 às 06H00 UTC nos níveis 850, 875, 900 e 909 hPa. Em cima: representação horizontal com posição (●) em intervalos de 3 horas. Dia/hora a azul e nível de pressão (em hPa) a vermelho (em intervalos de 12 horas) para o nível 909 hPa. Em baixo: representação vertical (Borrego *et al.*, 2005b).

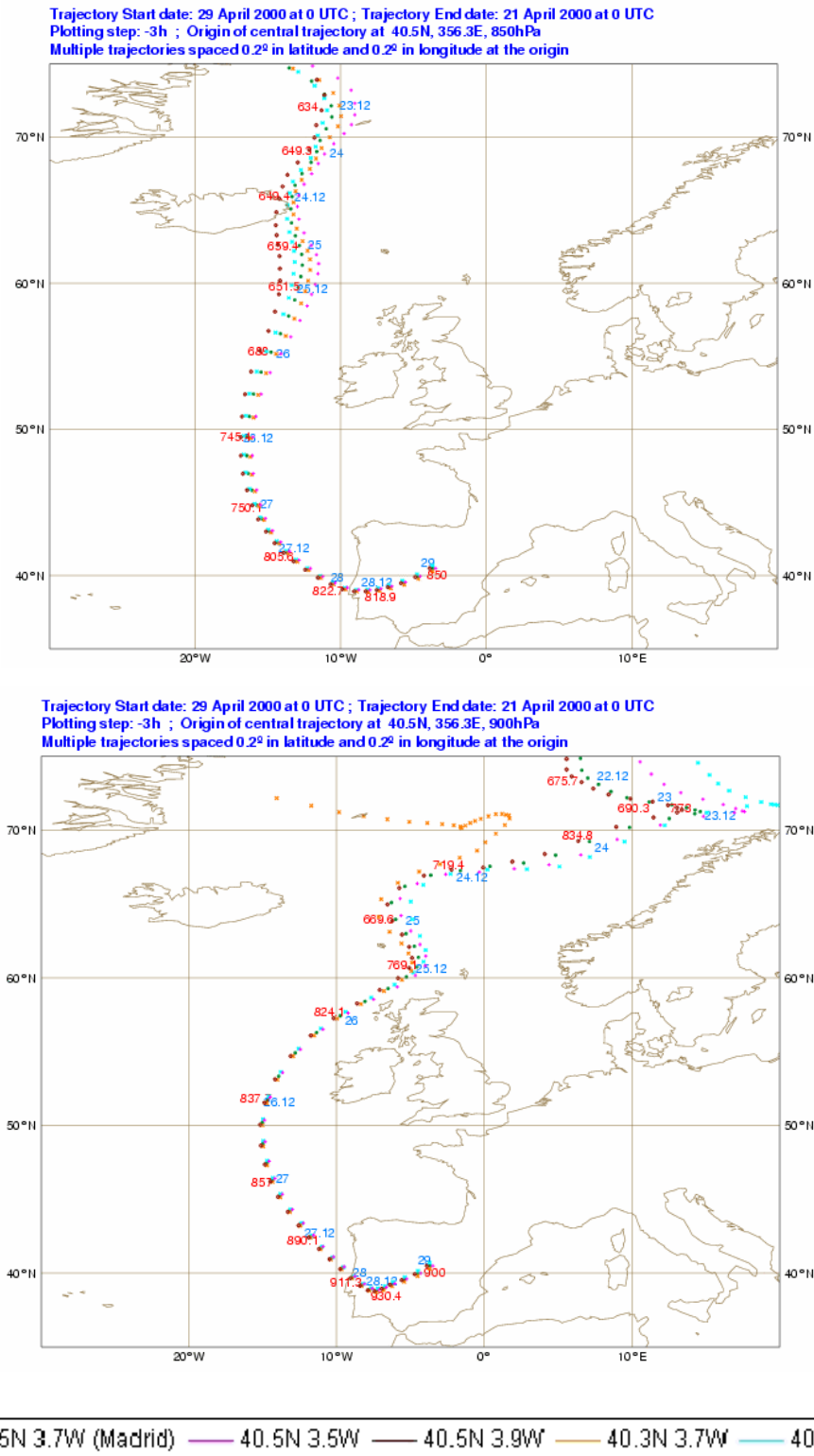


Figura 5.30: Retrotrajectórias das partículas, calculadas pelo KNMI, que chegam a Madrid (40.5°N 3.7°W) e a 4 localizações vizinhas (0.2° a norte, a sul, a oeste e a leste) no dia 29 de Abril de 2000 às 00H00 UTC, no nível 850 hPa (em cima) e 900 hPa (em baixo) (Borrego *et al.*, 2005b).

No dia 29 Abril, às 00H00 UTC, os valores de humidade relativa das radiossondagens apresentam-se baixos junto à superfície, tanto nos mapas Este-Oeste como nos mapas Norte-Sul sobre a região de Madrid (ver Figura 5.28), o que normalmente está associado a massas de ar de origem estratosférica.

As situações de vale identificadas na descrição das condições meteorológicas verificadas neste episódio meteorológico (Borrego *et al.*, 2005b) estão associadas à passagem de valores de coluna total de ozono elevados sobre a Península Ibérica entre os dias 25 e 28 de Abril, inclusivamente (Figura 5.31).

O episódio meteorológico foi posteriormente simulado pelo sistema MM5 entre os dias 21 de Abril e o dia 1 de Maio de 2000. Neste exercício de modelação mantiveram-se apenas os dois domínios de simulação de menor resolução (domínios 1 e 2 apresentados na Figura 5.7) pois considerou-se ser suficiente uma resolução de malha de 30 km sobre a região de Madrid, uma vez que houve um grande número de estações de qualidade do ar a registar elevadas concentrações de ozono.

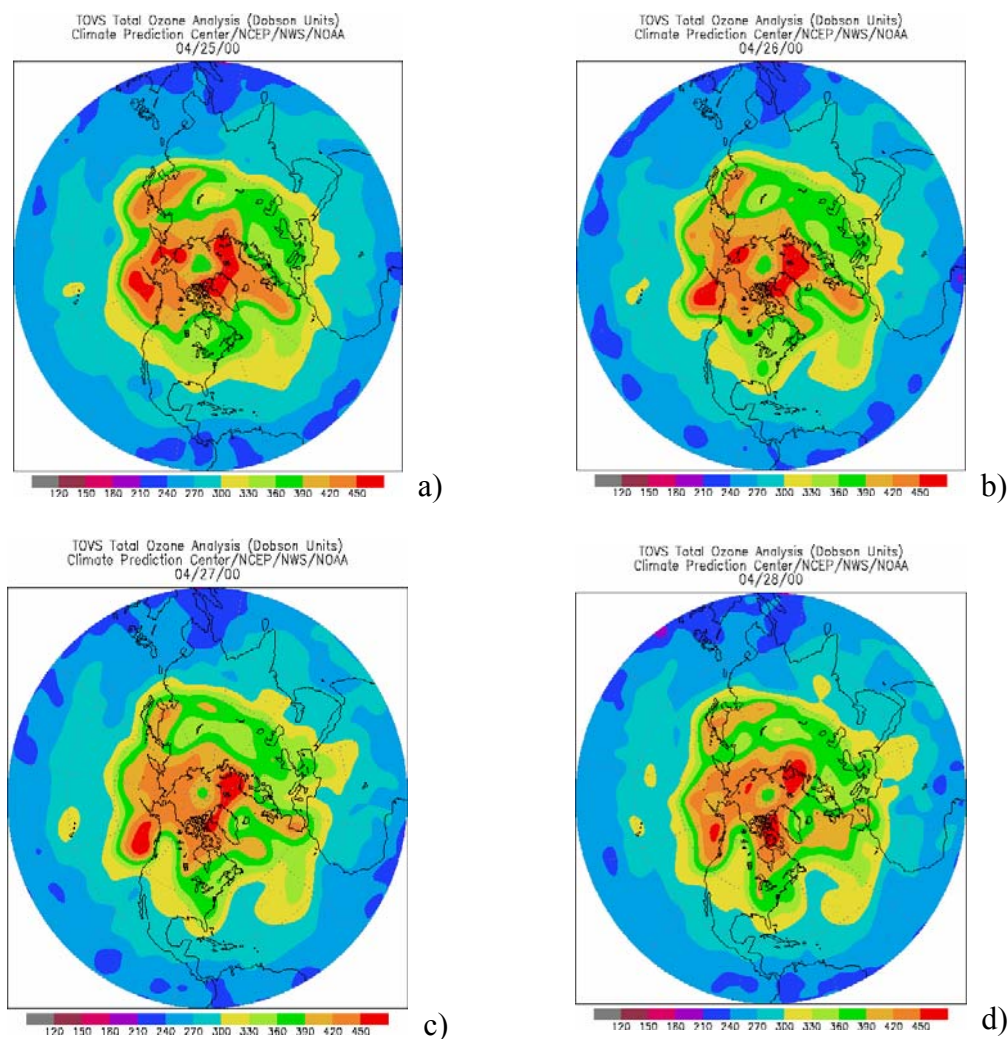


Figura 5.31: Coluna total de ozono sobre o hemisfério Norte em a) 25 b) 26 c) 27 e d) 28 de Abril de 2000 (URL 19).

Tal como sugerido pela análise meteorológica realizada em Borrego *et al.* (2005b), os instantes mais relevantes na análise deste período são aqueles em que as trajectórias da partícula que chegam a Madrid no dia 29 às 00H00 e 06H00 UTC estiveram próximas da tropopausa no dia 21 entre as 12H00 e as 18H00 UTC. A tropopausa atingiu níveis entre os 400 e os 500 hPa, entre a Gronelândia e o Norte da Islândia. Contudo, o domínio de aplicação de menor resolução não atinge estas latitudes tão setentrionais, sendo impossível mostrar a anomalia da tropopausa neste período. Todavia, esta anomalia deslocou-se para norte das Ilhas Britânicas tendo-se identificado uma dobra na tropopausa no dia 24 às 12H00 UTC que atinge níveis de pressão superiores a 600 hPa. Esta dobra é visível nas simulações numéricas realizadas com o MM5. Nestas, observa-se o seu início no dia 22 de Abril às 13 horas tornando-se mais profunda e abrangendo uma área maior no dia 24 de Abril.

A Figura 5.32 ilustra a superfície de vorticidade potencial de 1,5 UPV, intersectada pela superfície isentrópica de 305 K. Se houver entrada de massa de ar estratosférico na troposfera livre resultante deste afundamento, este poderá ser transportado pela isentrópica de 305 K, que apresenta uma inclinação acentuada no rebordo Sul do vale em altitude, atingindo a superfície na parte Sul do domínio, ou seja, sobre a região do Norte de África.

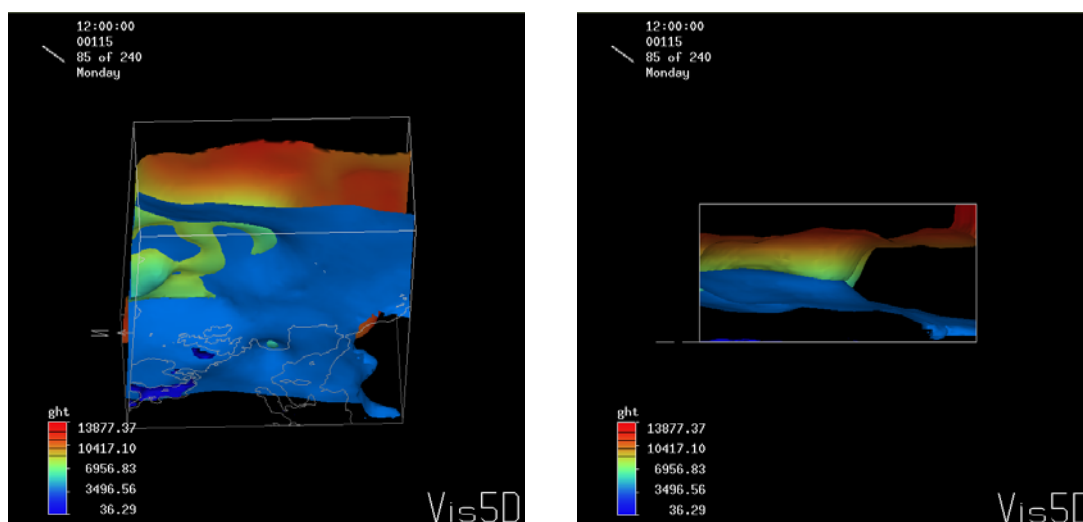


Figura 5.32: Vorticidade potencial isentrópica, a cuja superfície corresponde a legenda de altura de geopotencial e isentrópica de 305 K a) vista do “interior” da terra; b) vista de Oeste.

Neste período, tal como anteriormente descrito, a Península Ibérica está sob a acção de sucessivos dias com a presença de vales em altitude associados a regiões depressionárias localizadas em superfície a latitudes a Norte da Península. Esta actividade está associada ao ondular da superfície de vorticidade potencial isentrópica e a acentuados declives da isosuperfície potencial isentrópica de 305 K durante todo o período de simulação, tal como pode ser seguido pela Figura 5.33 nos dias 26 e 27 de Abril de 2000. Nesta figura é também visível uma bolha de ar estratosférico que se mantém abaixo da superfície isentrópica de 305 durante estes dois dias e que pode ter enriquecido de ozono o ar da troposfera livre.

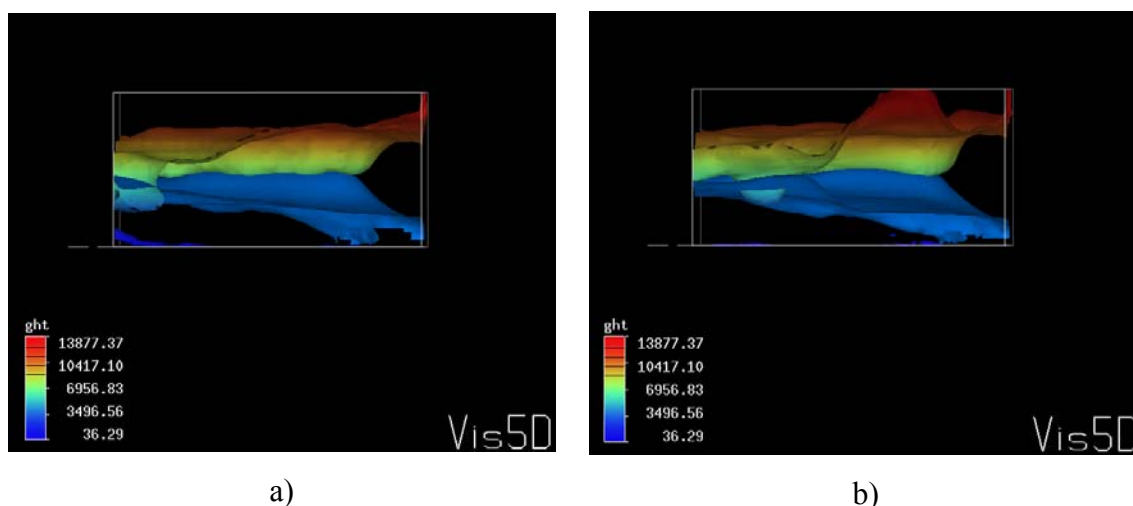


Figura 5.33: Vorticidade potencial isentrópica, a cuja superfície corresponde a legenda de altura de geopotencial e isentrópica de 305 K a) dia 27 de Abril às 12H00 UTC; b) dia 28 de Abril de 2000, às 12H00 UTC.

A humidade relativa associada a retrotrajectórias calculadas pelo modelo HYSPLIT que chegam a Madrid no dia 29 de Abril às 00H00 UTC aos níveis de 700, 1500 e 2000 metros ajuda a visualizar o transporte eventual de massa de ar estratosférico pelas superfícies isentrópicas. A Figura 5.34 representa duas trajectórias com passagem em zonas de baixos teores de humidade, as trajectórias 2 e 3. Esta última contém valores baixos deste parâmetro na região em que a partícula apresenta um grande desnível vertical. Este desnível possui uma forma semelhante ao desnível apresentado pela isentrópica que se observa nas Figuras 5.32 e 5.33.

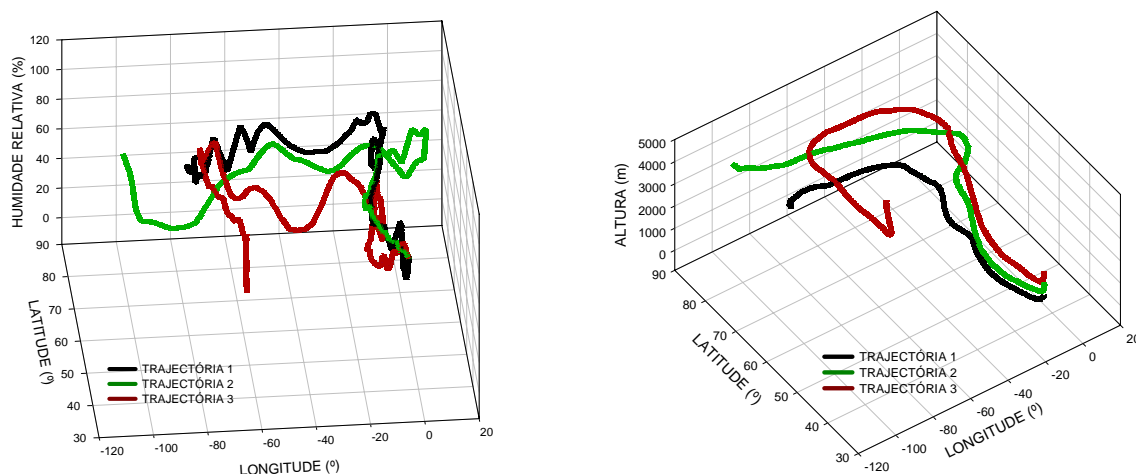


Figura 5.34: Representação tridimensional da humidade relativa e altitude correspondente às partículas associadas às três trajectórias que chegam à latitude-longitude de Madrid a 700 m (TRAJECTÓRIA 1), 1500 m (TRAJECTÓRIA 2) e 2000 m (TRAJECTÓRIA 3).

5.2.4 Simulação e análise do episódio 4: Portugal, Maio de 2001

Este último caso de estudo focaliza-se num período que de grande actividade fotoquímica. Contrariamente aos três eventos anteriores, o período definido como episódio meteorológico inclui várias ultrapassagens ao limiar de informação ao público, em várias estações a nível nacional, durante seis dias entre os dias 27 de Maio e o dia 1 de Junho de 2001.

As estações com registos de concentrações superiores a $180 \mu\text{g.m}^{-3}$ encontram-se no litoral, nomeadamente, em Estarreja, Sines, Áreas Metropolitanas de Lisboa e Porto, tendo-se atingido o máximo de $358 \mu\text{g.m}^{-3}$ em Teixugueira, no dia 29 de Maio às 18H00. Esta estação é a única em que as concentrações de ozono ultrapassam os $300 \mu\text{g.m}^{-3}$, consecutivamente, entre o dia 27 e o dia 29 de Maio de 2001.

A análise dos dados de coluna total de ozono existentes na base de dados do TOMS mostrou que, durante o episódio meteorológico definido, os seus valores são relativamente baixos à latitude do Sul da Europa. Não há actividade da tropopausa a registar durante este período. Ao nível do mar, a Península Ibérica está sob a acção de um Anticiclone intenso no dia 20, que enfraquece e volta a intensificar-se no dia 30 de Maio. Esta situação é responsável pelo escoamento fraco que se fez sentir durante este período.

As simulações realizadas com o sistema de modelos MM5/CAM_x permitem concluir que este período reuniu condições meteorológicas propícias à produção e transporte de ozono de origem fotoquímica (Salmim, 2005). A Figura 5.35 representa a evolução das concentrações de ozono em três estações de fundo, no Norte, Centro e Costa Alentejana. A escolha destas estações permite avaliar o desempenho do modelo fotoquímico para a escala da sua aplicação, ou seja, Portugal Continental, com resolução de 10 km x 10 km. Nas duas estações setentrionais, o sistema de modelos avalia bem a evolução diária das concentrações de ozono observadas, tanto no que se refere ao consumo nocturno deste poluente como aos picos que atinge durante as horas de máxima radiação solar. Os resultados do modelo na costa Vicentina são menos bons devido ao forçamento imposto pelo modelo meteorológico (Salmim, 2005).

Os estudos realizados com base nos valores de ozono da rede de qualidade do ar do Instituto do Ambiente entre 1988 e 2001 indicam que as maiores percentagens de ocorrência de ultrapassagens ao limiar de alerta à população ocorrem sobretudo às 14H00 UTC (Borrego *et al.*, 2003a). Assim, mostram-se na Figura 5.36 os campos de concentração de ozono à superfície, às 14 horas dos dias 27 e 28 de Maio de 2001.

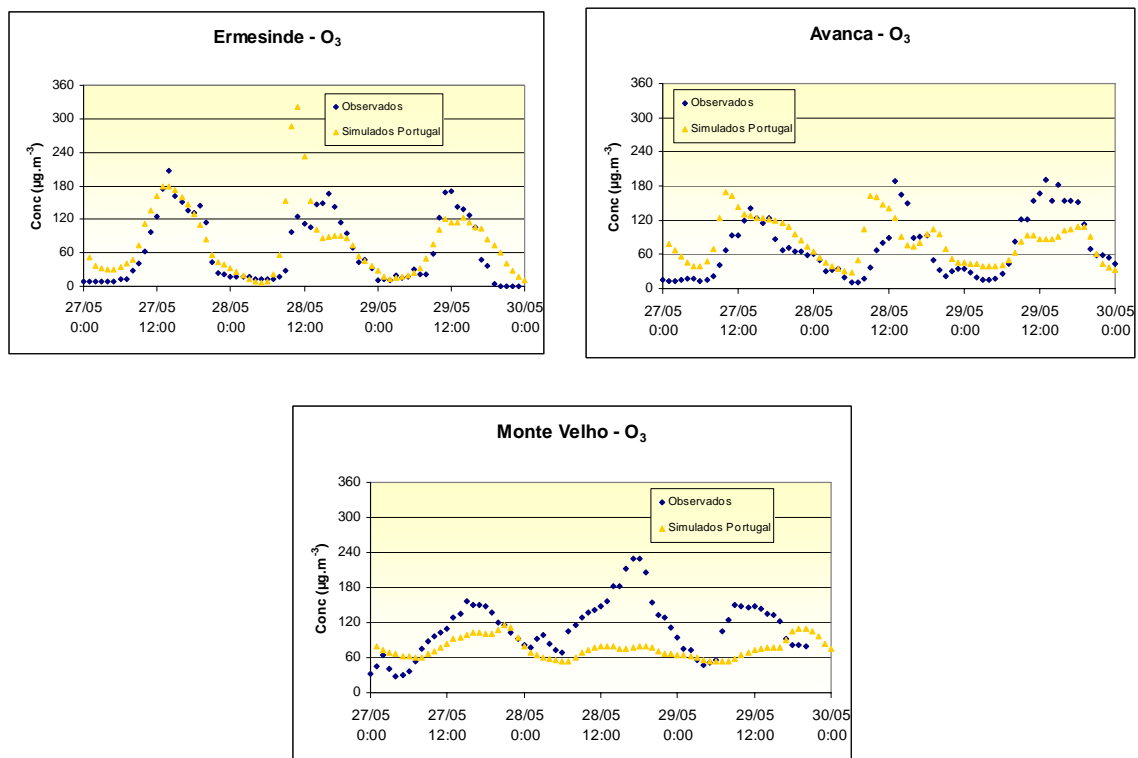


Figura 5.35: Evolução temporal das concentrações de ozono nas estações de fundo de Ermesinde (Norte), Avanca (Centro) e Monte Velho (Costa Alentejana) no período de 27 a 29 de Maio 2001.

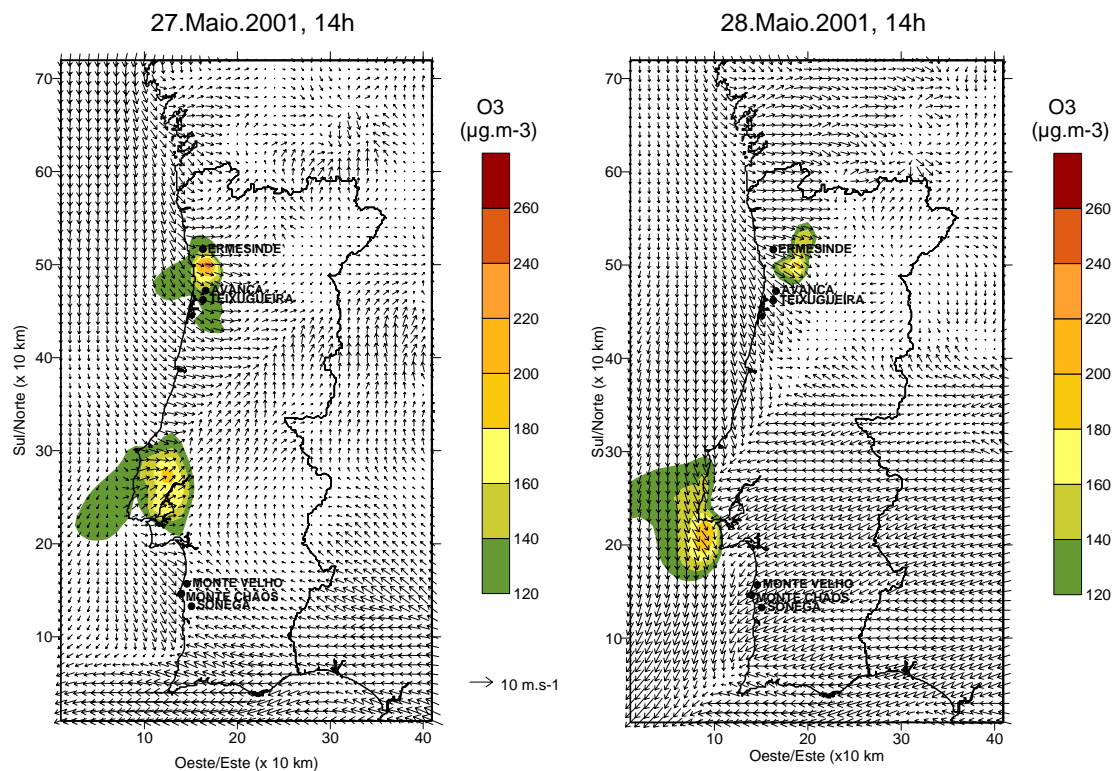


Figura 5.36: Campo de concentrações de ozono, rumo e velocidade do vento à superfície nos dias 27 e 28 de Maio, às 14H00 UTC.

As concentrações de ozono em superfície são elevadas na costa portuguesa junto às zonas metropolitanas de Lisboa e Porto, atingindo valores superiores a $220 \mu\text{g.m}^{-3}$ na região Norte e acima dos $200 \mu\text{g.m}^{-3}$ na região da grande Lisboa. Como é de esperar, o rumo do vento tem uma grande influência no transporte de poluentes. Assim, no dia 28 de Maio, o rumo de Noroeste, associado a intensidades do vento mais elevadas a esta hora, induz o transporte para o interior do domínio, na parte norte do país e mais para Sul, na região da grande Lisboa, comparativamente com o que se observa no dia 27 de Maio. A forte componente de leste simulada na parte Sul de Portugal é a responsável pelo desempenho menos bom do sistema de modelos na situação meteorológica sentida nesse dia. A forte intensidade desta componente mantém a pluma de ozono sobre o Oceano Atlântico, não permitindo a sua entrada sobre o continente.

Pelos resultados obtidos na simulação deste episódio de ozono, generalizado a nível nacional, parece ser pouco provável que haja ozono de procedência estratosférica durante este período. As condições favoráveis ao aparecimento de ozono de origem fotoquímica fica demonstrada, contrariamente aos resultados obtidos sobre Coimbra no estudo efectuado para a determinação das causas do episódio de ozono registado em 17 de Janeiro de 1996.

Síntese conclusiva

Em termos gerais salientam-se os seguintes resultados obtidos no trabalho desenvolvido neste capítulo:

- Os episódios com potencial intrusão estratosférica apresentam campos de pressão em superfície variados, onde não é possível identificar qualquer padrão discriminatório, nem mesmo em relação ao período de episódios de ozono com origem fotoquímica. Tal não é verdade quando se analisam as cartas de altura de geopotencial aos 500 hPa (Figura 5.37). No caso dos episódios com enriquecimento de ar estratosférico é possível observar em todos eles uma situação de vale, enquanto que no episódios de origem fotoquímica se apresenta uma situação de crista.
- As retrotrajectórias calculadas que chegam aos ponto de interesse aos níveis mais elevados, são aquelas em que as partículas atravessaram massas de ar com valores de humidade característicos de ar estratosférico há menos tempo. Parece haver uma indicação de entrada da partícula onde a actividade da tropopausa é elevada, perto da corrente de jacto, sendo difícil identificar concretamente quais são os mecanismos responsáveis pelo transporte deste poluente para dentro da camada limite.
- A análise dos registos de ozono em Janeiro de 1996 permite dizer que a baixa troposfera é enriquecida com ar estratosférico em condições de forte actividade da tropopausa, com sistemas frontais activos e em passagem constante sobre Portugal continental. A entrada de ar na camada limite dá-se posteriormente em condições anticiclónicas, talvez o mecanismo de transporte hipotético tipo ii sugerido por Johnson e Viezee (1981) Figura 5.2. Em Madrid, a partícula parece entrar na

troposfera no sistema depressionário que se forma sobre o Noroeste da Península Ibérica, e viajando ao longo dos declives das isentrópicas sendo transportado para junto da superfície pelos movimentos verticais associados à forte nebulosidade. O transporte ao longo das isentrópicas parece ser também a explicação para o evento de 27 de Dezembro.

- Os resultados do modelo de meso-escala MM5 permitem seguir a evolução espacial e temporal de um afundamento da tropopausa dinâmica com origem a milhares de quilómetros de distância do local do episódio. A sua maior resolução em relação aos dados de re-análise da ERA-40 fornece indicações complementares detalhadas das hipóteses colocadas com o estudo das retrotrajectórias. A possibilidade de aumentar, ainda mais, a resolução sobre a região de menor área onde se dá o episódio, recorrendo à técnica de *nesting*, ajuda a isolar situações em que a análise sinóptica de vortacidade potencial não identifique intrusões de pequena escala em situações de convecção ou pequenas bolhas de ar estratosférico à escala sinóptica. Por outro lado, o modelo fotoquímico CAMx ajuda a discriminar a possibilidade de origem fotoquímica dos episódios de ozono.

A importância da introdução de ozono estratosférico na baixa troposfera pode ser relevante em cenário de clima futuro pois os estudos incluídos em UE (2003) indicam uma forte probabilidade de aumento do fluxo descendente de ozono na atmosfera.

Isobáricas ao nível superficial

Altura de geopotencial aos 500 hPa

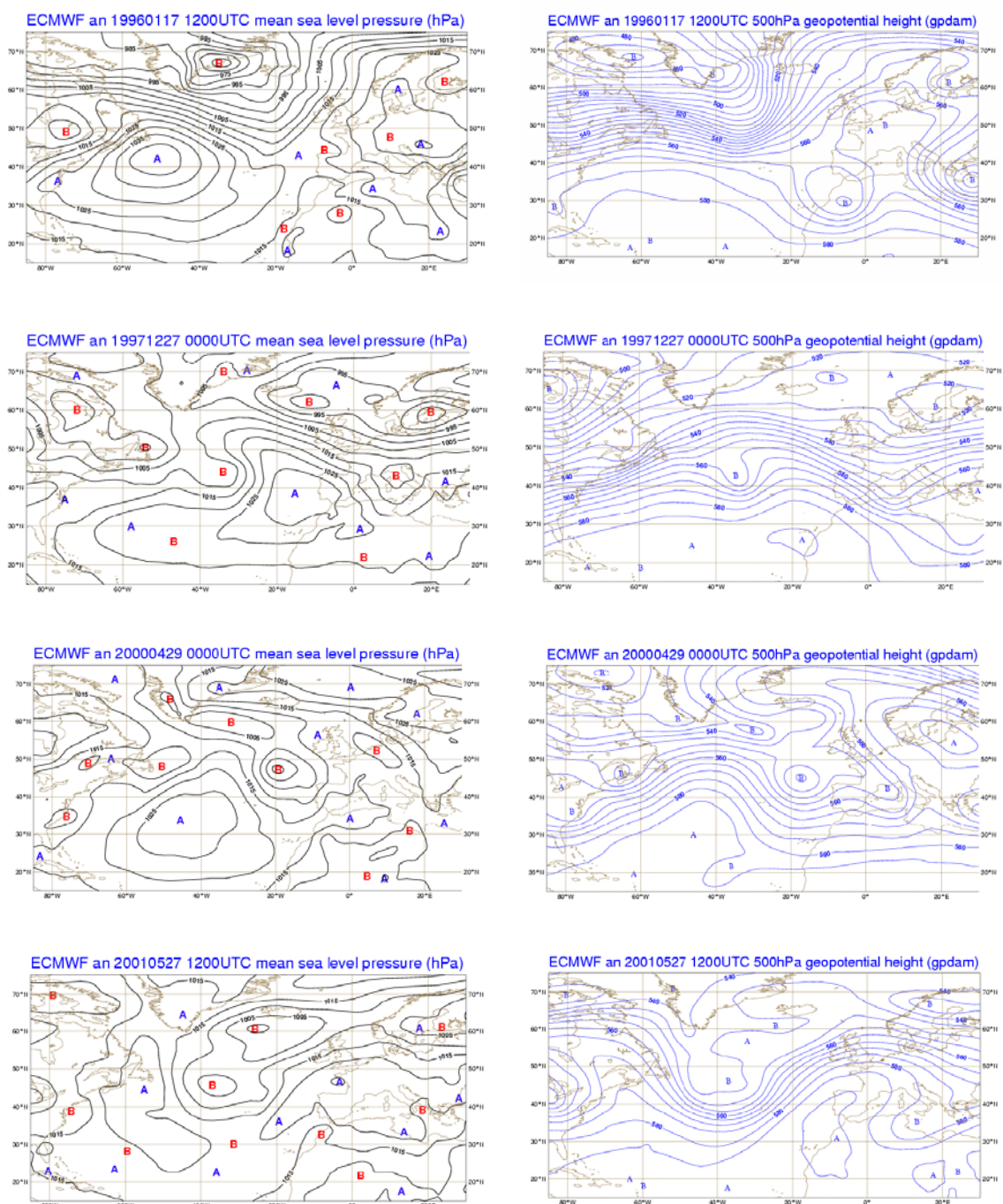


Figura 5.37: Campos de pressão à superfície e altura de geopotencial aos 500 hPa, às 12H00 UTC dos casos de estudo apresentados (Borrego *et al.*, 2005b).

Capítulo 6

6 Alterações climáticas em Portugal

As alterações climáticas são apontadas como uma das principais ameaças ao desenvolvimento sustentável mundial e muita investigação tem vindo a ser desenvolvida visando prever, prevenir e mitigar o seu impacto. As variações no clima são devidas a diferentes agentes forçadores, que actuam em diferentes escalas temporais. O IPCC (IPCC, 2001) reconhece duas origens para estes agentes forçadores, a natural e a antropogénica. Constituem factores de forçamento natural, por exemplo, a variação da actividade solar e a introdução GEE pela actividade vulcânica, ou em maiores escalas temporais as variações da órbita terrestre. Por outro lado, e numa escala temporal mais curta, a actividade antropogénica emite para a atmosfera GEE e aerossóis que perturbam o balanço radiativo terrestre (IPCC, 2001). Estes factores alteram globalmente a composição da atmosfera e todo o balanço radiativo, em termos médios e de forma não linear. Os modelos climáticos de circulação geral permitem simular a circulação geral da atmosfera tendo em consideração os diferentes forçamentos referidos. Para efeitos comparativos, apresentam-se na Figura 6.1 os resultados de simulações resultantes de três situações de forçamento sobrepostos aos valores medidos da variação de temperatura.

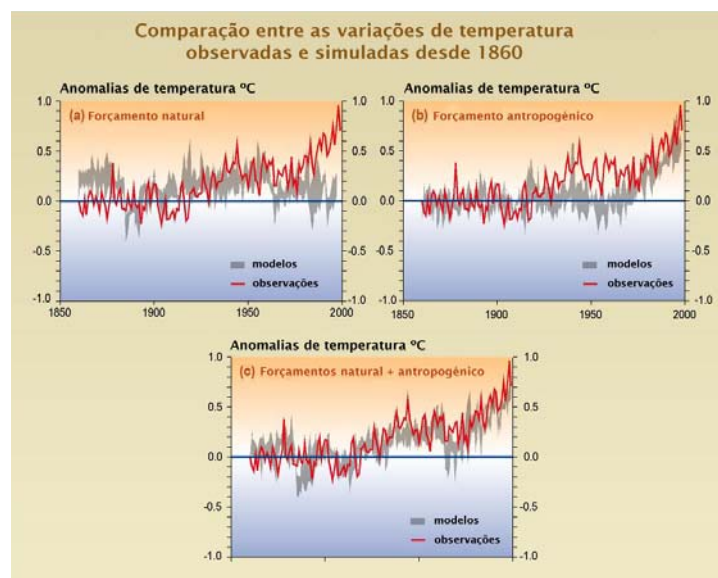


Figura 6.1: Simulação das anomalias de temperatura na Terra (°C) e comparação com valores observados em três situações de forçamentos a) naturais, b) antropogénicos e c) ambos, (IPCC, 2001).

Os GCM constituem uma ferramenta preciosa permitindo estimar, à escala global, valores de temperatura, precipitação, humidade relativa, entre outras variáveis, para diferentes cenários de concentração de GEE.

Como o clima também depende das emissões de GEE resultantes da actividade humana, relacionadas com a demanda energética de cada sociedade e os tipos de fontes de energia utilizadas, os estudos de impactes, mitigação e vulnerabilidade às alterações climáticas requerem projecções de emissões de GEE e aerossóis a longo prazo. Estas emissões adquirem diferentes quantificações, consoante as hipóteses de evolução possíveis no que se refere à tecnologia disponível, e ao crescimento económico e demográfico, entre outros factores (IPCC, 2000). Uma vez que “o futuro é incerto e não pode ser previsto” (OECD/IEA, 2003) deverão ser consideradas diferentes abordagens nas premissas referentes à evolução das sociedades nas questões acima descritas, considerando as incertezas associadas a estes estudos de impactes. Neste contexto, o IPCC quantificou quarenta cenários de emissões de GEE e aerossóis que agrupou em quatro famílias. A título de exemplo, na Figura 6.2, apresentam-se os campos de anomalias de temperatura, em 2050, calculadas relativamente às normais climatológicas de 1961-1990, para o trimestre Junho-Julho-Agosto. Estes campos foram obtidos através de dois modelos (HadCM3 e NIES99) para dois cenários SRES (“Special Report on Emission Scenarios”, IPCC, 2000) diferentes: A1F (tendo por base um acentuado desenvolvimento económico favorecendo a economia global) e B2a (orientado na direcção de um desenvolvimento regional sustentado, com fortes preocupações ambientais).

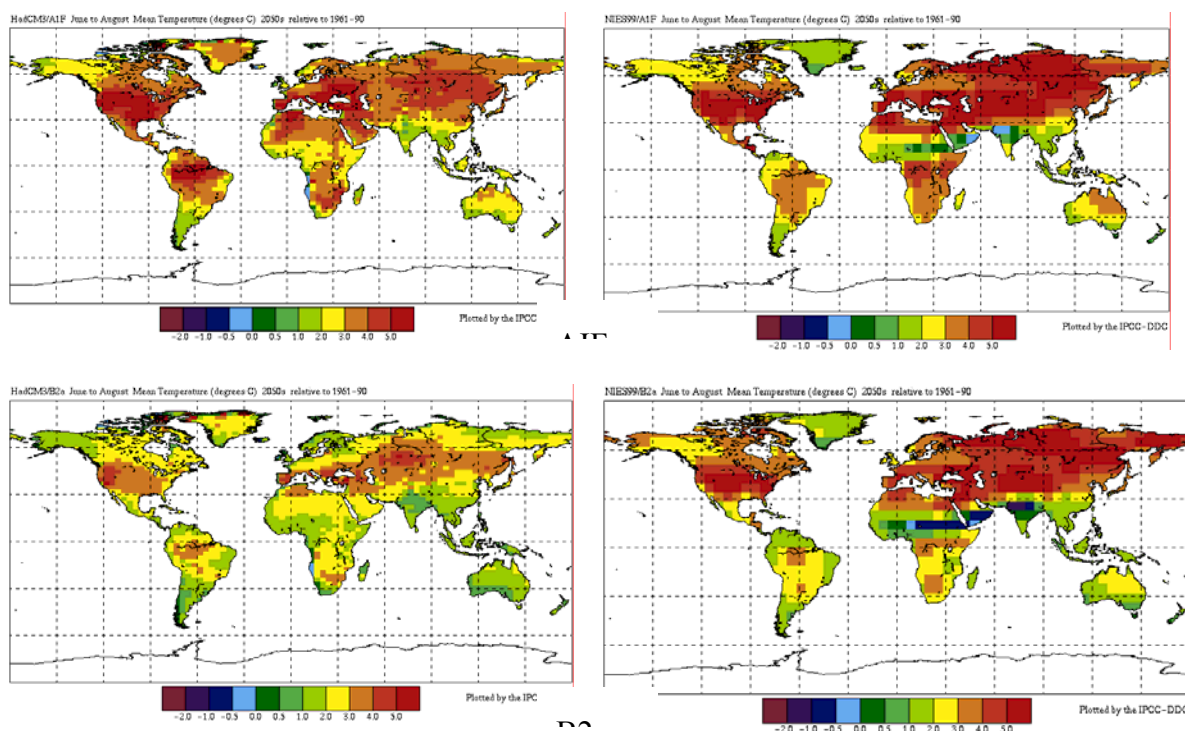


Figura 6.2: Campos de anomalias de temperatura em 2050, simulados pelos modelos de circulação geral HadCM3 e NIES99, para os cenários SRES A1F e B2a (URL 23).

Este exemplo ilustra como o mesmo modelo produz resultados diferentes consoante os cenários simulados, e também como estes resultados variam quando se simula o mesmo cenário com diferentes modelos. Contudo em ambos os casos, o aumento de temperatura em 2050 é inferior quando as emissões de GEE seguem a linha histórica do cenário B2a.

O impacto das alterações climáticas irá fazer-se sentir em áreas de interesse social, económico e científico tão distintas como a saúde, o ciclo hidrológico, uso de solo, entre outras. No presente estudo, a análise focalizar-se-á nos efeitos ao nível da qualidade do ar e na ocorrência de incêndios florestais.

Relativamente à qualidade do ar, a investigação actual identifica como um dos poluentes críticos, a todas as escalas espaciais, o ozono (O_3). A investigação sobre o ozono troposférico teve início há cerca de 150 anos, quando se descobriu que a sua concentração ultrapassava níveis tóxicos, durante episódios de poluição fotoquímica, no Sul da Califórnia. Mais recentemente verificou-se que as concentrações de fundo de ozono na baixa troposfera sobre a Europa aumentaram de um factor de dois, ou mais, desde o início do Século XX (Volz e Kley, 1988). As variações da concentração de ozono em superfície poderão ter um efeito no balanço radiativo à escala global estimando-se em $0,2-0,5 \text{ W.m}^{-2}$ o seu forçamento radiativo desde a era pré-industrial (UE, 2003). Devido à sua toxicidade para plantas, animais e seres humanos, e à sua importância como GEE, foram definidas estratégias para reduzir os níveis de ozono na troposfera, incluindo a adopção de diversos Protocolos e Directivas da União Europeia.

Os níveis de ozono na troposfera são controlados pela distribuição das emissões dos seus precursores, tais como hidrocarbonetos e óxidos de azoto, pelos processos fotoquímicos locais, que dependem da temperatura e da radiação solar, e pelo transporte na troposfera. Tais factores são responsáveis pelo facto das tendências de ozono observadas não serem homogéneas apresentando diferentes valores regionais. Refira-se a título de exemplo, o projecto SPARC (URL 24), em que se verificou que as estações situadas no Canadá mostram tendências de ozono decrescentes, ou não apresentam qualquer tendência significativa, enquanto que as estações situadas na Europa e no Japão apresentam tendências crescentes.

A Figura 6.3 ilustra os processos físicos e químicos envolvidos no balanço do ozono troposférico e referidos de forma mais abrangente no Capítulo 2.

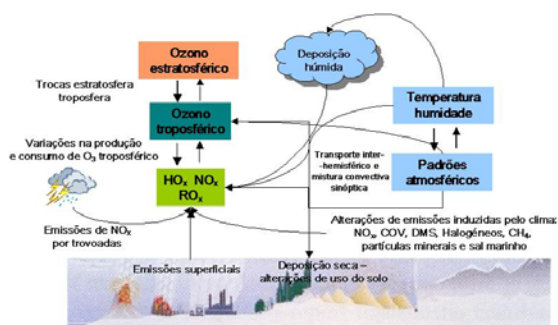


Figura 6.3: Processos físicos e químicos envolvidos no balanço de ozono troposférico (adaptado de UE, 2003).

Nas suas previsões acerca das distribuições globais futuras de diversos constituintes da atmosfera, o IPCC examinou as concentrações superficiais de ozono para os vários cenários de emissões. Os estudos sugerem que as concentrações médias de ozono na Primavera e no Verão de 2030 irão aumentar cerca de 10 ppb, em resultado de incrementos nas emissões globais de precursores deste poluente (IPCC, 2001). Uma das áreas de maior incerteza no que respeita às futuras concentrações de ozono troposférico, reside na resolução espacial inadequada utilizada pelos actuais modelos globais, que não permite a consideração de processos que ocorram a uma escala inferior à considerada pela grelha do modelo (Volz-Thomas *et al.*, 2002). Embora os GCM produzam resultados satisfatórios à escala global, o seu desempenho vê-se diminuído quando se pretende aplicá-los a escalas regionais, não sendo por isso possível simular fenómenos de meso-escala, tais como os processos de produção fotoquímica local, directamente com este tipo de modelos (IPCC, 2001; Martin, 1998, Howe e Henderson-Sellers, 1997). Esta questão é pertinente não só no que se refere à afinação da resolução espacial do clima simulado numa área limitada, mas também pela importância regional que os parâmetros meteorológicos têm na produção e remoção de ozono da troposfera e ainda pela distribuição regional das emissões de precursores de ozono.

O clima e as condições meteorológicas também são de extrema importância na deflagração e propagação de incêndios florestais. Usando parâmetros meteorológicos adequados é possível estabelecer um índice meteorológico de risco de incêndio, que traduz matematicamente o risco de incêndio a que uma dada região está sujeita, tendo em consideração as condições meteorológicas.

A ignição e propagação do fogo são sensíveis à interacção de diferentes factores como a meteorologia, o combustível e a topografia. A meteorologia e o clima desempenham um papel crucial na determinação do regime de incêndios de uma determinada área. Condições de temperatura elevada e humidade relativa baixa correspondem geralmente a áreas ardidas elevadas mas não necessariamente a um maior número de ocorrências. O clima determina a quantidade total de coberto vegetal disponível para combustão e a duração e gravidade da época de incêndios florestais. Por outro lado, as condições meteorológicas regulam o conteúdo de humidade da biomassa morta, e, conseqüentemente, o seu potencial de inflamabilidade. Em Pausas (2004) a ligação entre ocorrência de incêndios florestais e variáveis climáticas é analisada, concluindo que a ignição do fogo é, em grande parte, determinada por factores humanos, mas que as variações na área ardida anualmente são explicadas por parâmetros climáticos. Considerando estas interacções é pertinente levantar uma questão: como será a actividade de incêndios florestais nas décadas futuras? Desde os anos 80, quando a modelação climática global dava ainda os primeiros passos, têm vindo a ser conduzidos estudos com o objectivo de estabelecer as ligações entre alterações climáticas e ocorrência de incêndios florestais. Em 2001, o Relatório do IPCC sugeriu que com o aquecimento global, a frequência de incêndios florestais iria aumentar em todo o mundo (IPCC, 2001). A área ardida no Canadá, por exemplo, poderá aumentar entre 74% a 118% no final do Século XXI (Amiro *et al.*, 2001).

A Europa tem vindo a sofrer um grande número de incêndios florestais causando perdas significativas em termos de vidas humanas e danos ambientais. A maioria dos incêndios

florestais tem lugar na região do Mediterrâneo, que sofre mais de 95% dos danos (EC, 2003). Os ecossistemas mediterrânicos estão entre os mais variáveis e frágeis do mundo, nomeadamente no que se refere a “climas de transição”, como a linha de transição Atlântico/Mediterrâneo, localizada sobre Portugal. O nosso país é um dos mais afectados por incêndios florestais na Europa, principalmente durante a época de Verão, caracterizada por tempo quente e seco.

Tal como referido no Capítulo 2, espera-se que em Portugal, o aumento da frequência de dias com temperatura elevada em cenário climático futuro incentive o ciclo fotoquímico atmosférico. Os resultados dos registos históricos mostraram que existe uma tendência positivo no aumento das concentrações de ozono medidas, que não é acompanhada de aumentos nos seus precursores.

No presente trabalho, atendendo à resolução espacial dos GCM e à escala a que se pretendem analisar os resultados, a abordagem adoptada recorreu à técnica de *downscaling* dinâmico na apreciação dos eventuais impactes na qualidade do ar e no índice meteorológico de risco de incêndio.

Por *downscaling* entende-se a transferência de informação entre escalas espaciais e temporais. Trata-se de um termo adoptado nos últimos anos para descrever uma série de técnicas, dinâmicas e/ou estatísticas, que relacionam as variáveis climáticas de escala local e regional com o forçamento atmosférico de grande escala (Heimann e Busch, 2000). No caso do *downscaling* dinâmico os resultados dos modelos de circulação geral são usados pelos modelos de meso-escala como condições fronteira e laterais dependentes do tempo, que consideram os forçamentos de temperatura da superfície da água, gelos marinhos, condições do solo, gases de efeito de estufa e aerossóis (Mearns *et al.*, 2003). As aplicações de área limitada, atendendo à topografia regional, estimam depois a distribuição de meso-escala dos parâmetros climatológicos correspondentes sobre o domínio considerado.

Utilizaram-se os resultados de um modelo de circulação geral (MUGCM – *Melbourne University General Circulation Model*), como condições fronteira, para simulações com o modelo meteorológico regional de elevada resolução (*Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model*, MM5). Os resultados obtidos com o modelo MM5, para Portugal, foram utilizados para calcular um índice meteorológico de risco de incêndio e, recorrendo posteriormente a um modelo de qualidade do ar (CAMx), foi determinado o impacte das alterações climáticas na qualidade do ar, nomeadamente na produção de poluentes fotoquímicos.

6.1 Impacte na qualidade do ar

Nesta secção descreve-se a metodologia seguida na obtenção de um inventário de emissões em 2050, para Portugal, e nos períodos seleccionados para as simulações na avaliação dos impactes das alterações climáticas na produção de ozono. Analisam-se os resultados a partir de campos de diferenciais entre concentrações de poluentes obtidas em simulação de

clima actual e clima futuro. Compram-se as distribuições de resultados das concentrações em algumas localidades de Portugal em ambos os cenários.

6.1.1 Inventário de emissões

A abordagem para averiguar o impacto e vulnerabilidade da libertação para a atmosfera de poluentes, num cenário de alteração climática, consiste também na quantificação das suas emissões, baseada em premissas de evolução económica e demográfica, e de desenvolvimento tecnológico para um determinado horizonte de tempo.

Foi necessário desenvolver uma metodologia para o cálculo das emissões em 2050, sintetizada na Figura 6.4, compatível com os pressupostos base do inventário de emissões usado em cenário de clima actual, descrito previamente no Capítulo 3.

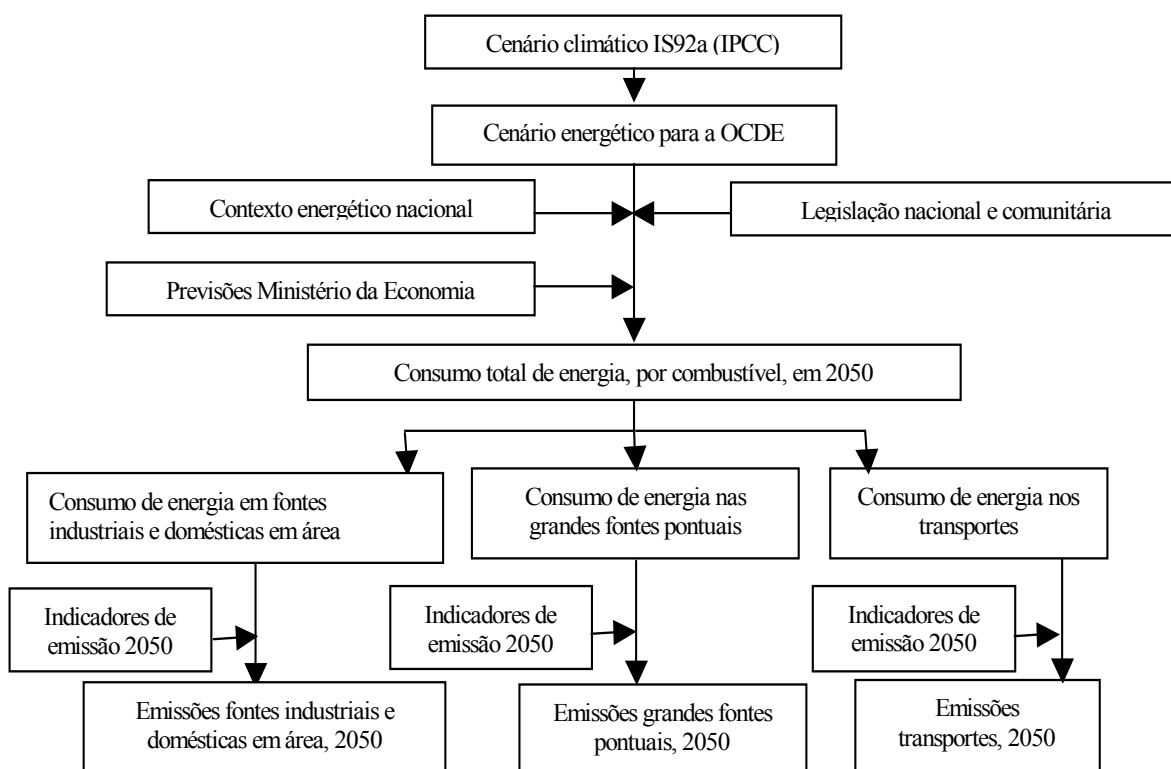


Figura 6.4: Metodologia de cálculo de emissões para o ano 2050.

A metodologia do cálculo de emissões seguiu duas etapas: projecção da procura de energia, por sector de actividade, em 2050, e determinação de indicadores de emissão energéticos. No que se refere ao consumo de energia em 2050, os valores obtidos basearam-se nas projecções do IPCC para países da OCDE, projecções de procura energética nacional e históricos de balanços energéticos. Houve uma preocupação de adequar o cenário de procura energética à estrutura energética, actual e prevista para Portugal, com o cenário (IS92a) de que se obtiveram as concentrações de CO₂ e aerossóis de sulfato consideradas nas simulações com o modelo MUGCM.

Os indicadores de emissão energéticos calcularam-se distintamente para o sector dos transportes e os restantes sectores. As emissões totais nacionais em 2050 reflectem as escolhas dos cenários de crescimento económico e estratégias de produção de energia.

6.1.2 Cenários globais do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC)

Em 1992, o IPCC definiu seis cenários de emissão de GEE para a atmosfera, os denominados cenários IS92 (de a a f), resultantes de previsões de grandes organizações internacionais ou em artigos de referência (Leggett *et al.*, 1992). Estes cenários incorporavam um conjunto vasto de hipóteses referentes à evolução das emissões de GEE, na ausência de implementação de políticas orientadas para a minimização da influência antropogénica no clima. As diferenças acentuadas nas hipóteses económicas, sociais e ambientais que constituem cada cenário resultaram numa gama de possíveis emissões de GEE com diferenças de uma ordem de magnitude.

O cenário IS92a foi adoptado pela comunidade internacional de modeladores como o cenário padrão, ou intermédio, na modelação de clima futuro sendo reconhecido na literatura como *business as usual* (Leggett *et al.*, 1992), apesar da filosofia subjacente à construção de cenários futuros partir do princípio de que nenhum dos cenários de emissões é mais plausível que qualquer outro.

As simulações realizadas pelo modelo MUGCM resultam das hipóteses colocadas para o cenário de emissões IS92a. Este cenário assume um aumento de população para 11,3 mil milhões em 2100, de acordo com as projecções do Banco Mundial. A taxa média anual de crescimento económico assumida foi de 2,3 %, inferior ao projectado pelo Banco Mundial, mantendo-se a disparidade entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento. A intensidade energética diminui 0,9% ao ano, com um misto de fontes de energia convencionais e renováveis.

Em 1996, e com o objectivo de actualizar e substituir os cenários IS92, o IPCC iniciou o desenvolvimento de um novo conjunto de cenários de emissões. Os pontos fracos identificados nos cenários IS92 incluíam:

- Gama limitada de intensidade energética de CO₂ (emissão de CO₂ por unidade de energia);
- Ausência de qualquer cenário com uma aproximação significativa dos rendimentos de países desenvolvidos e de países em desenvolvimento;
- Na elaboração dos cenários IS92 foram usadas estimativas para o ano base de 1990, tendo entretanto sido disponibilizados dados reais;
- Crescimento demasiado elevado das emissões de SO₂ nos países da OCDE, não reflectindo a legislação existente relativa a este poluente;
- A reestruturação da Europa Central e de Leste e dos Novos Estados Independentes da antiga União Soviética afectou grandemente a actividade económica, com reduções de emissões de CO₂ não previstas nos cenários IS92;

- desenvolvimento de modelos de avaliação integrados tornou possível a construção de cenários de emissões internamente consistentes (considerando as interações entre o uso de energia, a economia e alterações do uso do solo), considerando interações nos dois sentidos entre agentes forçadores e possíveis impactes das alterações climáticas.

Assim, de forma a ultrapassar as lacunas detectadas nos cenários IS92 o IPCC publicou, em 2000, o *Special Report on Emission Scenarios (SRES)*, onde diferentes grupos de modelação desenvolveram cenários de emissões comparáveis e detalhados (IPCC, 2000).

Através de um processo iterativo de identificação das principais forças motrizes e incertezas, foram desenvolvidas linhas-históricas que deram origem a 4 famílias de cenários quantitativos (IPCC, 2000), descrevendo desenvolvimentos em várias dimensões diferentes (social, económica, ambiental e política):

A **Família A1** descreve um mundo futuro de crescimento económico rápido, crescimento populacional baixo e uma rápida introdução de tecnologias novas e mais eficientes. Os aspectos subjacentes incluem a convergência entre regiões, aumento das interações sociais e culturais, com uma redução substancial nas diferenças regionais do rendimento *per capita*. Esta família de cenários desenvolve-se em quatro grupos que descrevem direcções alternativas de mudanças tecnológicas no sistema energético: A1C (carvão-intensivo), A1G (petróleo e gás natural intensivo), A1B (equilíbrio entre fontes de energia fósseis e não-fósseis) e A1T (fontes de energia não-fósseis).

A **Família A2** descreve um mundo bastante heterogéneo, em que os principais aspectos subjacentes são a individualidade e a preservação da identidade local. Os padrões de fertilidade regionais convergem lentamente, traduzindo-se num crescimento populacional elevado. O desenvolvimento económico está orientado de forma regional sendo o crescimento económico *per capita* e as alterações na tecnologia mais fragmentadas e lentas do que nas restantes linhas-históricas.

A **Família B1** descreve um mundo convergente, com o mesmo crescimento populacional admitido na Família A1, contudo com alterações rápidas nas estruturas económicas no sentido da economia de serviços e de informação, redução na intensidade material e introdução de tecnologias limpas e eficientes. Particular ênfase é dada a soluções globais de sustentabilidade económica, social e ambiental, mas sem iniciativas adicionais relativas às alterações climáticas.

Na **Família B2** as soluções locais para a sustentabilidade económica, social e ambiental são as preferidas. O crescimento populacional e económico dá-se a um ritmo moderado, e as alterações tecnológicas serão menos rápidas, todavia mais diversificadas do que o suposto nas linhas-históricas B1 e A1. Embora também seja um cenário orientado para a protecção ambiental e equidade social, focaliza-se às escalas local e regional.

É de referir que nenhum dos cenários SRES assume explicitamente qualquer cumprimento de metas internacionais ratificadas no seio da Convenção-Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (UNFCCC), de que é exemplo o Protocolo de Quioto (IPCC, 2000).

A Figura 6.5 ilustra esquematicamente os cenários SRES, evidenciando como base das 4 famílias as forças motrizes das emissões de GEE, e em que cada família tem em comum a especificação das forças motrizes. As duas dimensões da árvore indicam a orientação regional/global dos cenários e o desenvolvimento económico/ambiental.

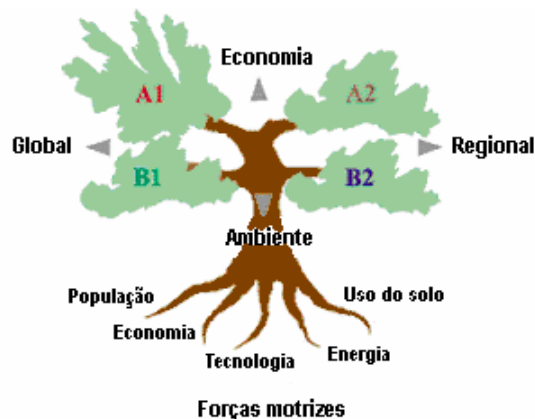


Figura 6.5: Ilustração esquemática dos cenários SRES (adaptado de IPCC, 2000).

A partir destas 4 famílias, as diferentes equipas de modelação envolvidas definiram um conjunto final de 40 cenários, cada um constituindo interpretações e quantificações alternativas de cada linha-histórica e reflectindo diferentes abordagens de modelação e diferentes perspectivas regionais. Para gerar estes 40 cenários foram usados 6 modelos: AIM, ASF, IMAGE, MARIA, MESSAGE e MiniCam (mais detalhes podem ser encontrados em IPCC, 2000). Os modelos forneceram resultados para 4 macro-regiões: OCDE90 (inclui todos os países parte da OCDE em 1990), REF (inclui os países da Europa de Leste e os Estados Independentes da antiga União Soviética), ASIA (todos os países em desenvolvimento da Ásia) e ALM (inclui o resto do mundo: países em desenvolvimento de África, América Latina e Médio-Oriente).

A razão principal pela qual se desenvolveu um grande número de cenários prende-se com a exploração das incertezas subjacentes às tendências do desenvolvimento a nível mundial e às emissões de GEE a elas associadas. A bibliografia actual sugere que o futuro é por definição imprevisível e diferindo grandemente as maneiras de o olhar; assim, o desenvolvimento de cenários “mais-provável”, “business-as-usual”, “surpreendentes” ou “desastrosos” não é possível nem desejável. Do mesmo modo as linhas-históricas devem ser consideradas como igualmente plausíveis e não como recomendações a quem decide politicamente (IPCC, 2000).

6.1.3 Metodologia - Energia

A metodologia desenvolvida para a elaboração de um cenário nacional de emissões em 2050 teve como base um cenário de evolução de consumo de energia para o mesmo horizonte temporal. A criação do cenário energético recorreu a previsões nacionais existentes até 2015 e também as quantificações disponibilizadas pelo IPCC referentes aos cenários SRES para os países da OCDE. Deste trabalho resultou um Balanço Energético

Nacional para 2050, com a energia consumida por tipo de combustível e sector de actividade.

Panorama energético nacional

Em termos energéticos, Portugal é um país altamente dependente do exterior, importando cerca de 90% da energia primária consumida. Em termos de fontes energéticas, no ano 2000 cerca de 60% da energia primária consumida proveio do petróleo, 15% do carvão, 9% do gás natural, introduzido como fonte de energia primária em 1997, e 15% das energias renováveis (URL 25).

A emissão de GEE está intimamente relacionada com as fontes de energia utilizadas no sistema energético de cada país. O esforço de introdução de combustíveis menos poluentes e/ou tecnologias mais limpas no sistema energético reflecte-se nas emissões de CO₂ equivalente para a atmosfera. Assim, a introdução do gás natural provocou em 1997 uma diminuição das emissões de GEE por unidade de PIB, uma vez que a quantidade de carbono presente no gás natural é inferior à contida no petróleo e no carvão (IA, 2002a). Têm também sido levados a cabo esforços no sentido da introdução da cogeração na produção de energia eléctrica e da melhoria da eficiência energética e tecnológica nos processos industriais, aliada a uma melhoria na qualidade dos combustíveis.

Cenário Futuro

O estudo do Ministério da Indústria e Energia (MIE, 1995), que define a estratégia para o sector energético, serviu de base para a estimativa do consumo de energia primária em Portugal até 2015. O estudo apresenta vários cenários, apoiados em diferentes perspectivas de desenvolvimento económico, industrial e demográfico, tendo-se seleccionado o cenário médio. Este cenário considera uma procura global de energia elevada conjugada com um desenvolvimento económico nacional e europeu intermédios, com decréscimo populacional e um consumo de energia aliado a um crescimento elevado no sector dos Transportes e da Indústria. Este último sofre uma melhoria na eficiência energética, enquanto que nos transportes o aumento do consumo de energia surge devido ao crescimento industrial, e consequente transporte de mercadorias, havendo também uma maior utilização de veículos pessoais. Dado apenas existirem projecções até 2015 foi necessário recorrer a outras fontes de informação para proceder à estimativa de emissões até 2050, nomeadamente aos cenários SRES mencionados em § 6.1.2.

Neste ponto do trabalho houve a necessidade de compatibilizar o cenário futuro que serviu como base de simulação do modelo climático global MUGCM, o IS92a, e os novos cenários de emissão de GEE publicados pelo IPCC, que serviram de orientação para as taxas de crescimento para o cenário de emissões de Portugal em 2050. Identificou-se, então, qual o cenário equiparável ao “velho” cenário IS92a, usado no forçamento do modelo climático global neste trabalho, tendo como base as concentrações de CO₂ na atmosfera em 2050. Analisando os pressupostos (económicos, populacionais e tecnológicos) de cada família de cenários concluiu-se que a família A1 é a que mais se aproxima dos pressupostos do cenário IS92a. Dentro da família A1, foi seleccionado o grupo de cenários A1G (intensivo em petróleo e gás natural) por ser o que mais se

aproxima da realidade nacional. Este cenário caracteriza-se por um baixo crescimento populacional, crescimento muito elevado do PIB e do uso de energia, com grande disponibilidade de recursos e rápida evolução tecnológica favorecendo o petróleo e o gás natural. A quantificação A1G-AIM é a que apresenta uma evolução mais próxima do panorama português por assentar predominantemente nos combustíveis fósseis (petróleo e gás natural). Este cenário considera ainda a energia nuclear como uma das fontes de energia primária. Não possuindo Portugal centrais nucleares para produção de energia, e não se prevendo a sua construção, a percentagem correspondente à energia nuclear no cenário A1G-AIM foi dividida igualmente entre o petróleo e o gás em 2020, enquanto a partir de 2030 foi atribuída totalmente ao gás natural.

O consumo de energia primária e a percentagem das diversas fontes de energia obtida para Portugal até 2050 vêm representados na Figura 6.6. Esta evolução resulta da evolução prevista no cenário médio do MIE até 2015 (MIE, 1995), conjugada para os restantes anos com os valores determinados pelo cenário A1G-AIM (SRES). Analisando a Figura 6.6 verifica-se uma ligeira diminuição da utilização do carvão, uma diminuição de cerca de 19 % na utilização do petróleo e um aumento de 20 % do gás natural como fonte de energia. As fontes de energia renovável aumentam de 15% em 2000 para 20 % em 2050. Este valor pode considerar-se bastante conservador no que toca à introdução de energias renováveis, pois o Conselho Europeu para as Energias Renováveis estima que 20 % da energia consumida seja proveniente de fonte renovável em 2020, com base nos objectivos propostos no Livro Branco das Energias Renováveis e em previsões feitas pelos industriais (URL 25).

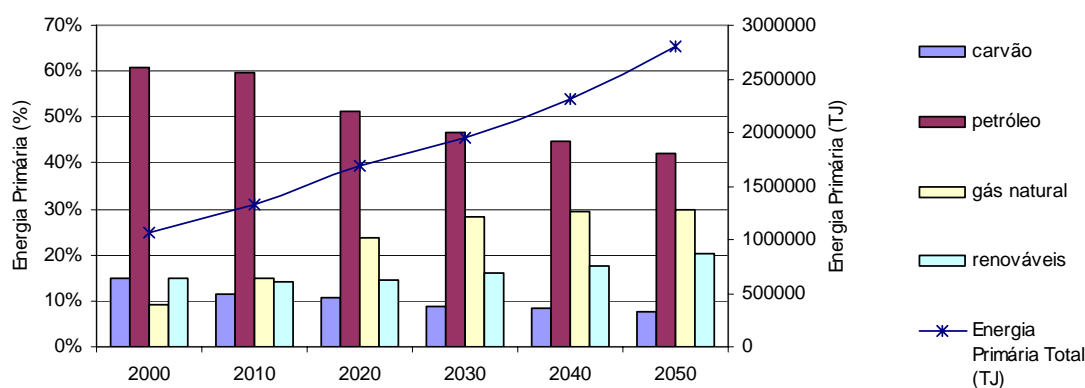


Figura 6.6: Consumo de energia primária e contribuição das diferentes fontes até 2050, para Portugal.

Em termos de distribuição por fonte de energia renovável, consideraram-se as seguintes: grandes hídricas e mini-hídricas, biomassa, eólica, solar fotovoltaico, oceanos, hidrogénio, biogás e biocombustíveis. O consumo de energia primária respeitante às fontes renováveis foi desagregado tendo em conta a situação no ano 2000 e as previsões encontradas nos seguintes documentos:

- Relatório Técnico de 2001 da EDP Produção: grandes hídricas, parques eólicos (EDP, 2001);

- Fórum Energias Renováveis em Portugal - Relatório Síntese: mini-hídricas, biomassa, eólica, solar fotovoltaico, oceanos, hidrogénio, biogás e biocombustíveis (ADENE / INETI, 2001);
- Directiva de Combustíveis Alternativos (COM (2001) 547 Final).

A Figura 6.7 apresenta a distribuição fontes de energia renováveis consideradas em 2050, para Portugal, e em que a biomassa, os biocombustíveis, o hidrogénio e os resíduos sólidos urbanos somam 74 % da diversidade das fontes.

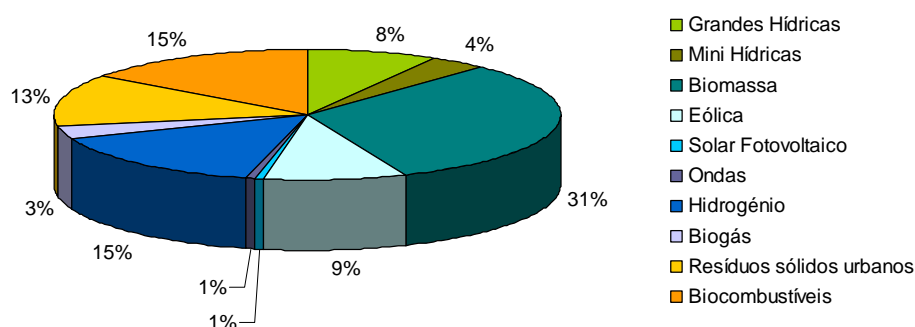


Figura 6.7: Fontes de energias renováveis em 2050.

Com o objectivo de determinar as emissões em 2050 e atendendo à evolução do consumo de energia primária e à contribuição das diferentes fontes, foi necessário proceder à desagregação desse consumo pelos diversos sectores do sistema energético nacional. Para tal foi seguida a estrutura dos actuais balanços energéticos nacionais (BE), e foram construídos balanços energéticos para 2010, 2020, 2030, 2040 e 2050, sendo considerados os seguintes sectores: produção de electricidade, refinação, agricultura e pescas, indústrias transformadoras, construção e obras públicas, comércio e serviços e transportes. Na construção destes BE foram tidos em consideração os actuais projectos existentes (de que são exemplo a construção de barragens e centrais termoeléctricas) e a legislação em vigor.

Produção de electricidade

Para a produção de electricidade foram consideradas as seguintes formas: termoelectricidade (carvão, derivados do petróleo e gás natural), grandes hídricas, mini-hídricas, eólica, solar, ondas e biogás. Partindo das estimativas para os consumos dos diferentes combustíveis, das previsões do relatório técnico da EDP (EDP, 2001) e do Fórum Energias Renováveis em Portugal (ADENE / INETI, 2001) estimou-se energia consumida (carvão, derivados de petróleo e gás natural) e a electricidade produzida pelas termoeléctricas e pelas diferentes fontes de energia renováveis.

Transportes

O sector dos transportes foi dividido em: aviação, navegação, caminhos-de-ferro e rodoviário. A projecção do consumo de energia neste sector teve como base o cenário médio de procura energética média prevista pelo MIE (MIE, 1995) até 2020 e

posteriormente a taxa de crescimento imposta iguala a de consumo de energia primária até 2050 (com que se construiu a Figura 6.6).

Obtido o consumo de energia no sector dos transportes procedeu-se à sua desagregação pelos diversos combustíveis considerados. Para tal foram seguidas as directrizes propostas pela directiva comunitária sobre combustíveis alternativos no transporte rodoviário e medidas de promoção de uso de biocombustíveis (COM (2001) 547 Final). Nesta proposta de directiva conclui-se que os combustíveis com maior potencial como alternativa aos combustíveis fósseis são os biocombustíveis, o gás natural e as células de hidrogénio. Relativamente à electricidade como fonte de energia no sector dos transportes, assumiu-se uma taxa de aumento de 10 % em 2020 nos meios rodoviário. Entre 2020 e 2050 essa taxa aumentou para 15 %. Estes valores assentam na hipótese da procura de energia nos caminhos-de-ferro ser a mesma suposta para os transportes rodoviários e na estimativa de que a penetração de veículos eléctricos no mercado possa estar entre os 5 e os 10 % em 2020 (Hickman *et al.*, 1999).

Comércio e Serviços

Dada a escassez de fontes de informação, a estimativa do consumo de energia no sector do Comércio e Serviços seguiu uma abordagem mais simples, tendo-se aplicado as taxas de crescimento encontradas para a evolução da energia primária.

Indústria Transformadora

No que se refere à procura de energia por parte da indústria transformadora seguiu-se a abordagem proposta pela Direcção Geral de Energia (DGE, 1999), na qual se analisam de forma independente os subsectores assentes no uso intensivo de energia e os subsectores restantes. Entre os primeiros encontram-se as indústrias química, pasta de papel e papel, cimento, vidro, cerâmica e siderurgia. As previsões do consumo de energia elaboradas pela DGE tiveram por base parâmetros económicos e tecnológicos:

- Cenário macro-económico médio do MIE (MIE, 1995);
- Cenário de competitividade na procura de energia da DGE (1999), também conhecido por cenário médio e que por esta razão foi o escolhido para a quantificação de consumo de energia pelo sector industrial.

Em resumo, a Figura 6.8 apresenta a distribuição percentual do total de energia a ser consumida em 2050 (cerca de 2800×10^3 TJ) por sector de actividade considerado no cálculo de emissões de poluentes atmosféricos para o mesmo horizonte temporal.

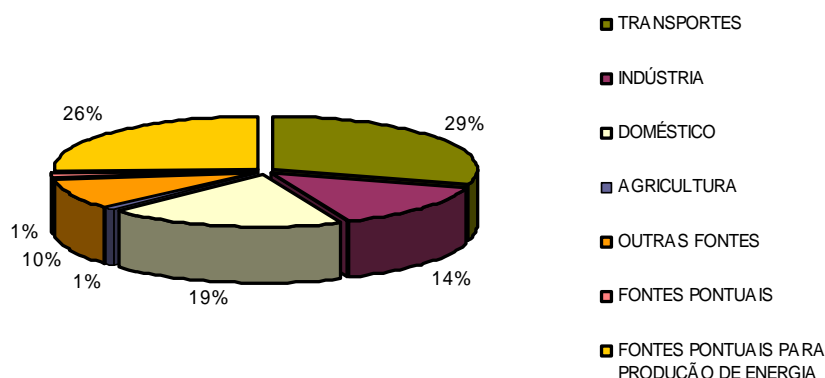


Figura 6.8: Distribuição da energia consumida por cada sector de actividade em 2050.

6.1.4 Metodologia - Emissões

Depois de quantificado o consumo de energia por sector foi necessário proceder à sua conversão para emissões de poluentes atmosféricos, através da determinação de indicadores de emissão energéticos (emissão de poluente por unidade de energia consumida), por sector de actividade. Para tal, usaram-se os históricos de emissões do inventário CORINAIR e os balanços energéticos nacionais desde 1990 até 2000. Seguidamente extrapolaram-se indicadores de emissão nacionais por sector em 2050, que permitiram o cálculo das emissões. Estas foram desagregadas em malha considerando a distribuição populacional ao nível de NUT2 prevista pelo INE para 2050 (INE, 2004).

Comércio, Serviços e Fontes Industriais em Área

São incluídas nesta categoria as actividades poluidoras com carácter difuso e as fontes pontuais de pequena dimensão. As principais fontes de informação neste sector incluem os históricos, entre 1990 e 2000, dos BE, dos inventários de emissões CORINAIR/EMEP e do IPCC.

No BE, agruparam-se como fontes as provenientes da agricultura, indústria extractiva, indústria transformadora, construção e obras públicas, sector doméstico e serviços. Analisou-se a energia anual por fonte energética usada por todos estes sectores, excepto a electricidade cujas emissões são contabilizadas à parte. O petróleo é a fonte de energia com maior peso (superior a 50 % em todos os anos analisados), tendo atingido o seu máximo de utilização em 1997, ano em que ocorreu a introdução do gás natural. As energias renováveis, maioritariamente biomassa, têm vindo a diminuir na sua contribuição no somatório destes sectores (de 38,6 % para 27,3 %), como é visível na Figura 6.9. Esta tendência de diminuição também se apresenta no consumo de carvão, estimado na ordem dos 3 %, em 2000.

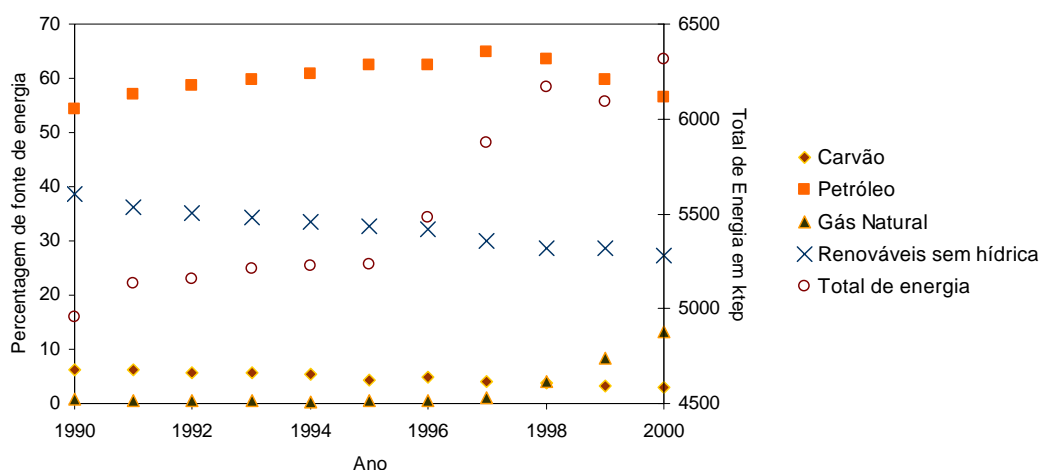


Figura 6.9: Evolução da composição energética nas fontes de emissão em área.

Por outro lado, agruparam-se as emissões de 8 dos 11 sectores do inventário CORINAIR (URL 7), excluindo-se: Transportes, Outras Fontes e Sumidouros e Combustão na Energia. Seguiu-se este critério de modo a aproximar a metodologia de cálculo das emissões em 2050 aos critérios subjacentes à construção da actual base de dados POLAR 2 (Monteiro *et al.*, 2001), utilizadas nas simulações fotoquímicas associadas ao clima presente.

O passo seguinte consistiu na determinação de um indicador de emissão energético anual para o NO_x , o CH_4 e os COVNM (Figura 6.10).

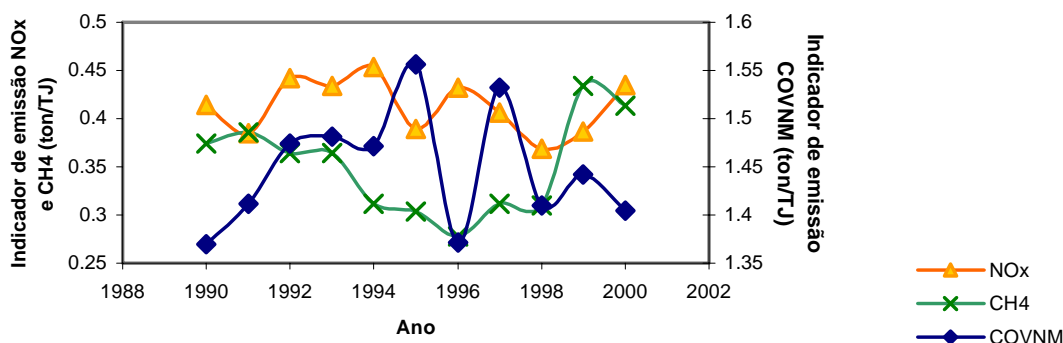


Figura 6.10: Evolução do indicador de emissão anual (ton.TJ^{-1}) para COVNM, NO_x e CH_4 .

Desde logo se pode constatar que o valor do indicador de emissão para os COVNM é uma ordem de grandeza superior relativamente a NO_x e CH_4 . Relativamente ao CH_4 é de realçar o aumento do indicador de emissão a partir de 1997, provavelmente devido à introdução do gás natural nos processos de combustão.

Com os históricos dos indicadores de emissão encontrados para o COVNM e CH_4 , e respectivas percentagens de combustíveis responsáveis pela sua emissão, estabeleceram-se rectas de multiregressão recorrendo ao *software* STATISTICA. A partir destas, utilizando os valores de percentagens de combustíveis previstos para o somatório destes sectores em

2050, extrapolou-se um valor de indicador de emissão para cada um destes grupos de poluentes atmosféricos.

No que se refere ao NO_x , não se aplicou a mesma metodologia pois foi impossível encontrar qualquer recta de regressão múltipla que permitisse a extrapolação de um valor em 2050, o que poderá ser explicado pelo facto das emissões de NO_x serem extremamente dependentes dos processos de combustão e das suas condições de operação. Assim, o indicador de emissão foi obtido através da média dos 11 anos de dados históricos disponíveis. A Tabela 6.1 apresenta os indicadores energéticos obtidos e os totais de emissão calculados para 2050.

Tabela 6.1: Indicadores energéticos de emissão e totais nacionais de emissão calculados para 2050.

Poluente atmosférico	Indicador energético de Emissão (ton.TJ⁻¹)	Totais Nacionais (ton)
CH ₄	0,61	702000
COVNM	1,346	1547500
NO _x	0,41	475000

Recorrendo aos valores totais em 2050 e atendendo à resolução espacial requerida pelo modelo fotoquímico, desagregaram-se as emissões para uma matriz de 10 km x 10 km. Assim, os factores de desagregação, descritos em Monteiro *et al.* (2001), foram afectados por um factor multiplicativo que pretende incorporar a evolução populacional em 2050, ao nível de NUT II (INE, 2004), ver Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Índice multiplicativo de evolução populacional 2000-2050 NUTII.

Norte	Centro	Lisboa e Vale do Tejo	Alentejo	Algarve
0,887	0,778	1,059	0,640	1,260

Fontes pontuais

Considerou-se que a localização das fontes pontuais em 2050 se manterá em relação à situação actual. As suas emissões foram estimadas com base nos factores de emissão actuais (EEA, 2002) para cada tipo de fonte, considerando alterações nas percentagens dos diferentes tipos de combustíveis, de acordo com a demanda energética anteriormente apresentada.

Transportes

No caso dos transportes, a metodologia adoptada para o cálculo dos indicadores energéticos de emissão é diferente do exposto para as fontes em área devido à existência de informação detalhada para o cálculo destes índices, por poluente e categoria de veículos. A informação de base no desenvolvimento do trabalho aqui exposto está compilada maioritariamente em Tchepel (2003).

Assim, a partir das percentagens de categorias de veículos presentes no parque automóvel português e da quilometragem anual média por categoria, estimadas no projecto europeu MEET (André *et al.*, 1999)., determinou-se uma percentagem de quilometragem média (Tabela 6.3).

Tabela 6.3: Quilometragem por categoria de veículo.

Categoria de veículos	Parque e densidade automóvel (%)	Quilometragem anual (km)	Quilometragem por categoria de veículo (%)
Ligeiros de passageiros	63,3	12000	63,9
Comerciais ligeiros e todo o terreno	21,4	15000	27,0
Pesados de mercadoria	2,5	35000	7,4
Autocarros	0,3	30223	0,8
Motos	12,6	908	1,0

O valor da energia consumida no sector dos transportes, e que provém maioritariamente de combustíveis derivados do petróleo, sobretudo gasolina e gasóleo, foi afectado pela percentagem de quilometragem por veículo, distribuindo-se assim a energia consumida pelas diferentes categorias de veículos. O mesmo se fez em relação às quantidades de poluentes emitidas nesse ano. Relacionando as duas quantidades entre si, obtiveram-se os indicadores energéticos de emissão, por categoria de veículo e por poluente. De modo a incluir os novos padrões de emissão a entrar em vigor já a partir de 2005, classe EURO4 (Directiva 1998/69/EC), fez-se uma média dos factores de redução de emissão calculados a partir dos modelos TREM e COPERT (Tchepel, 2003). Os indicadores de emissão foram então multiplicados por estes factores de redução, tendo-se obtido os resultados presentes na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Indicadores energéticos de emissão anuais por poluente e por categoria de veículo (ton.TJ⁻¹ petróleo).

Categoria de veículos	NO_x	CH₄	COVNM
Ligeiros de passageiros	3,28x10 ⁻¹	4,10x10 ⁻³	1,87x10 ⁻¹
Comerciais ligeiros e todo o terreno	2,75x10 ⁻¹	2,52x10 ⁻³	1,15x ⁻¹
Pesados de mercadoria	8,12x10 ⁻²	1,70x10 ⁻³	7,74x10 ⁻²
Autocarros	9,41x10 ⁻²	1,97x10 ⁻³	8,97x10 ⁻²
Motos	1,04x10 ¹	1,42x10 ⁻¹	6,47

Contudo, em 2050 o petróleo não será a única fonte de combustível no sector dos transportes sendo necessário calcular indicadores energéticos de emissão para biocombustíveis e gás natural. Em Tchepel (2003) analisa-se a variação de emissões entre os diferentes tipos de combustíveis utilizados pelo transporte rodoviário, recorrendo a factores de escala. Considerou-se que o biodiesel seria maioritariamente substituto do gasóleo em veículos pesados, enquanto o gás natural iria substituir a gasolina em veículos ligeiros de passageiros. Por conjugação da informação da quantidade de energia por combustível e dos indicadores energéticos de emissão, por poluente e combustível obtiveram-se os totais nacionais, por poluente, que se apresentam na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Totais nacionais de emissão por poluente no presente e em 2050 (ton).

Poluente	Presente	Ano 2050
NO _x	204000	686000
CH ₄	2790	9600
COVNM	127000	438000

Emissões biogénicas

As emissões de isopreno e monoterpeno dependem do tipo de vegetação florestal, sendo afectadas por factores como a área e densidade florestal, temperatura do ar e radiação solar. A metodologia de cálculo das emissões destes compostos seguiu o descrito em Tchepel (1997), tendo-se obtido matrizes de emissão com base nos factores meteorológicos calculados para 2050. Não foram consideradas alterações do uso do solo, tendo sido usada a base de dados Corine Land Cover (Tchepel, 1997).

Em síntese, a metodologia descrita permitiu a criação de um cenário de emissões do tipo não interventivo, atingindo-se aumentos consideráveis de emissão de poluentes atmosféricos, nomeadamente dos precursores de ozono. Subjacente a estes aumentos estão os indicadores de emissão estimados de uma forma conservadora por falta de informação/estudos existentes a longo prazo. De facto, a nível nacional os estudos feitos até à data apresentam um horizonte muito curto (até 2015). O cenário de crescimento energético elaborado reflecte uma grande procura de energia em 2050, devendo questionar-se os tipos de combustível usados, e a sua proporção, para a satisfazer.

6.1.5 Metodologia - Modelação de parâmetros meteorológicos e da qualidade do ar

A metodologia usada baseou-se na aplicação de uma cascata de modelos desde a escala global até a meso-escala. O modelo global MUGCM (Simmonds, 1985; Simmonds *et al.*, 1988), para o qual se desenvolveu especificamente um processador de interface (Borrego *et al.*, 2004), forneceu os campos meteorológicos 3D ao modelo regional MM5 (Dudhia,

1993) cujas saídas foram usadas como entradas no modelo fotoquímico CAM_x (ENVIRON, 2004). A Figura 6.11 representa a cascata de modelos usada neste estudo, podendo observar-se os dados de entrada necessários aos diferentes modelos e as saídas desejadas, calculadas pelo modelo fotoquímico CAM_x, ou seja, os campos 3D de concentração de poluentes gasosos.

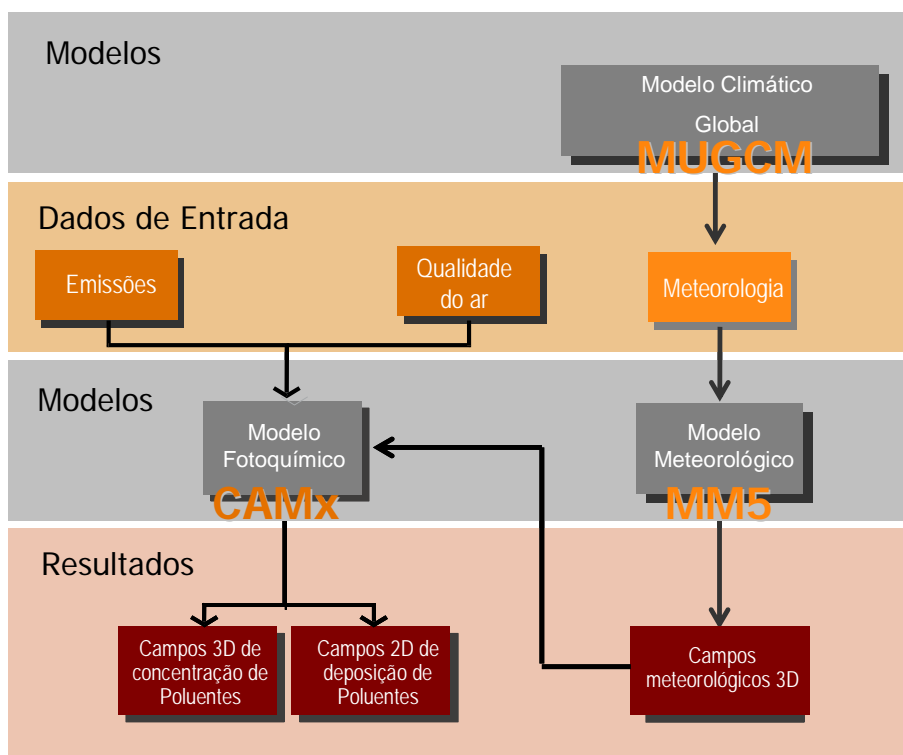


Figura 6.11: Cascata de modelos usada na análise da qualidade do ar.

O MUGCM é um modelo atmosférico espectral com 31 ondas, o que equivale a uma resolução horizontal de 2,25° (LAT) X 3,75° (LON), correspondendo a uma área de 300 x 246 km² a 45° de latitude. O modelo possui nove níveis “sigma” verticais e inclui os ciclos diário e sazonal. A insolação no topo da atmosfera é especificada para a declinação média diária. A formulação da camada limite, com os cálculos dos fluxos de calor latente e sensível, é feita através da teoria de Monin-Obukhov. O albedo do solo depende do seu conteúdo em água. A radiação interage com o vapor de água, nuvens, CO₂ e ozono O₃, sendo os dois primeiros calculados pelo modelo e os restantes estabelecidos com base em distribuições climatológicas.

Foram efectuadas dois conjuntos de simulações de equilíbrio por aplicação do modelo MUGCM. Com o primeiro conjunto de simulações pretendeu-se estimar o clima presente, tendo sido prescritas concentrações de dióxido de carbono e aerossóis atmosféricos actuais. No segundo conjunto de simulações, estas concentrações foram aumentadas de acordo com cenários internacionalmente aceites e obtidos do Hadley Center (HadCM) para o cenário IS92a do IPCC (IPCC, 1994). Em ambas as situações as condições fronteira foram ditadas pelas climatologias do gelo marinho e das temperaturas superficial do mar (SST). O

objectivo dos dois conjuntos de simulações consiste na detecção de eventuais alterações climáticas resultantes de um aumento da concentração de CO₂ e aerossóis de sulfato antropogénicos, na atmosfera. A Tabela 6.6 apresenta um resumo dos cenários climáticos simulados pelo modelo global MUGCM.

Cada conjunto de simulações é composto por 30 anos para obtenção de variabilidade em cada cenário climático e significância estatística das diferenças na variabilidade climática simulada. Esta variabilidade é conseguida em cada simulação através das variações das condições iniciais definidas no MUGCM.

Tabela 6.6: Características dos cenários climáticos simulados (Carvalho, A., 2002).

Simulação do clima actual (centrado no ano de 1990)	Simulação do clima futuro (centrado no ano de 2050)
Campos mensais das SST climatológicas do clima actual	Campos mensais das SST climatológicas do clima futuro
Concentração de gases de efeito de estufa, representada pela concentração equivalente de CO ₂ de 348 ppmv	Concentração de gases de efeito de estufa, representada pela concentração equivalente de CO ₂ de 634 ppmv.
Campo actual anual da concentração dos aerossóis de sulfato	Campo futuro anual estimado da concentração dos aerossóis de sulfato

A resposta do MUGCM ao forçamento radiativo imposto pelas alterações nas concentrações de CO₂ e aerossóis de sulfato foi comparada com outros modelos de circulação geral. Para tal testou-se o modelo MUGCM tendo-se obtido um forçamento radiativo de $-0,63 \text{ W.m}^{-2}$ para as concentrações actuais dos aerossóis atmosféricos e do CO₂ e de $4,7 \text{ W.m}^{-2}$ para uma concentração dupla de CO₂. Estes valores estão de acordo com os obtidos por outros modelos, particularmente o modelo do Hadley Centre (Mitchell e Johns, 1997). Com forçamentos radiativos semelhantes nos dois modelos, justifica-se a utilização das SSTs geradas pelo HadCM₂ no MUGCM.

A técnica de *downscaling* dinâmico foi aplicada, para ambos os cenários climáticos, para a simulação dos parâmetros meteorológicos usados no cálculo do FWI e na simulação da poluição fotoquímica em Portugal continental. No que se refere a esta última aplicação, os resultados do modelo MM5 foram usados como dados de entrada no modelo de qualidade do ar, bem como os inventários de emissões desenvolvidos para ambos cenários. Assim, foi possível avaliar o potencial impacte duma perturbação climática nos padrões de ozono junto à superfície.

Seleção dos períodos de interesse a simular

Para a avaliação da qualidade do ar para ambos os cenários climáticos, a cascata de modelos foi aplicada a períodos de tempo determinados, definidos como episódios de produção fotoquímica. Definiu-se como episódio propício ao desenvolvimento de produção fotoquímica o número de dias consecutivos com temperaturas médias diárias

superiores a 25 °C, desta forma garantiu-se que o máximo de temperatura seria superior a 25 °C, condição que em conjunto com ocorrência de ventos fracos está associada à ocorrência de valores elevados de O₃ (Santos *et al.*, 2002). Assim, analisaram-se as temperaturas médias diárias simuladas pelo MUGCM e identificaram-se os episódios em cada conjunto de simulações globais, determinando-se o episódio médio em cada cenário climático simulado. Para as simulações centradas em 1990 foram identificados 144 episódios, enquanto nas simulações centradas em 2050 se identificaram 222 episódios, dando desde logo a indicação de um agravamento no que diz respeito ao número de dias consecutivos com temperaturas elevadas num cenário de clima futuro. Compararam-se os episódios identificados com o episódio médio e desta comparação resultou a selecção do episódio que mais se aproxima do episódio médio, um para clima actual e outro para o clima futuro. Finalmente seleccionou-se, para cada clima, um episódio representativo do episódio médio a simular pela cascata de modelos. Na Figura 6.12 representa-se um exemplo do tipo de abordagem utilizada na selecção dos episódios a simular.

a) Clima actual

1990							
Run	dia central	dur	T med	Run	dia central	dur	T med
1	173	7	300.5	(...)	(...)	(...)	(...)
1	188	5	299.3	13	179	5	299.7
1	198	6	299.4	13	229	4	299.7
1	211	4	299.2	14	193	14	299.5
2	173	3	299	14	221	9	300.5
2	189	2	298.5	14	253	4	299.1
2	198	6	298.4	15	127	4	300
2	243	7	298.2	15	163	5	299
3	160	5	300.3	15	170	3	299.1
(...)	(...)	(...)	(...)	15	179	6	299.9
30	145	5	298.7	15	216	5	301.6
30	164	2	298.2	15	234	5	299.8
30	182	14	298.9	16	146	4	300.5
30	205	18	299.7	16	157	4	399.5
30	221	12	298.2	16	173	7	300.7
31	185	4	299.9	16	218	4	290.4
31	206	4	298.7	16	227	3	299.5
31	226	9	299.4	17	199	7	301
média	190.5	6.1	299.8	(...)	(...)	(...)	(...)

b) Clima futuro

2050							
Run	dia central	dur	T med	Run	dia central	dur	T med
1	155	7	298.8	(...)	(...)	(...)	(...)
1	170	18	300.4	18	176	3	300.7
1	183	2	300.5	18	196	10	299.6
1	191	8	303.3	18	206	5	298.2
1	204	14	299.1	18	217	9	299.2
1	226	18	301.4	18	246	3	299.5
1	241	3	298.2	18	257	6	299.9
1	258	10	301	19	160	3	300.5
2	163	2	299.3	19	166	2	299.3
(...)	(...)	(...)	(...)	19	172	6	300.3
31	151	3	300.8	19	178	4	301.4
31	162	3	298.6	19	210	10	299.2
31	194	12	298.4	19	220	5	299.8
31	204	5	298.5	19	237	8	298.3
31	216	11	299.7	19	247	6	298.7
31	232	4	300.5	20	151	9	299.4
31	241	2	299.6	20	169	2	300.5
31	251	2	298.6	20	183	21	301.3
média	198.1	6.3		(...)	(...)	(...)	(...)

Figura 6.12: Selecção de um episódio representativo de episódio médio para cada clima.

6.1.6 Simulação da qualidade do ar

O modelo CAMx foi aplicado de acordo com a metodologia descrita, para um domínio de simulação coincidente com o domínio de simulação menor do MM5 e para uma resolução horizontal de 10 km x 10 km.

Os resultados do modelo fotoquímico foram analisados segundo duas vertentes: distribuição geográfica dos diferenciais das médias dos episódios simulados e análise estatística local. A discussão dos valores obtidos é feita segundo a legislação actualmente em vigor que, no que se refere ao ozono, estabelece como limiar de alerta e limiar de informação ao público as concentrações horárias de 240 e 180 $\mu\text{g.m}^{-3}$, respectivamente (DL N.º 320/2003). Por seu lado, as concentrações de NO_2 não deverão exceder o valor limite horário para a protecção da saúde humana de 200 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (DL N.º 111/2002).

Para a análise estatística local das concentrações dos poluentes, seleccionaram-se nove localizações de postos da actual rede de qualidade do ar, distribuídas tanto no litoral como no interior do país, ver Figura 6.13.

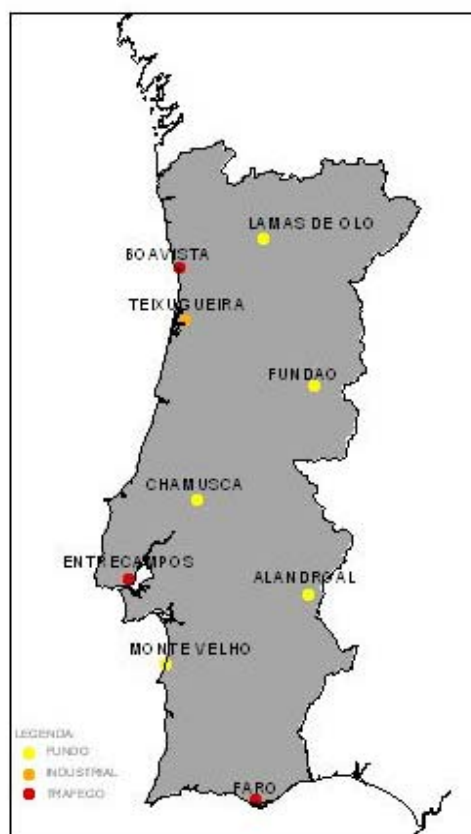


Figura 6.13: Localização das estações da qualidade do ar.

Para cada episódio seleccionado estimaram-se as médias, e respectivos desvios padrão, dos valores horários de ozono e dióxido de azoto, na célula de cálculo referente à localização de cada posto de monitorização da qualidade do ar, nos cenários de clima actual e clima

futuro. Em forma de síntese, a Tabela 6.7 e Tabela 6.8 apresentam a média, para os dias de duração de cada episódio, das concentrações dos dois poluentes considerados.

A média das concentrações estimadas nas localidades seleccionadas indica que as concentrações de NO₂ aumentam em cenário de clima futuro em cerca de 111 %. Em todas localidades as médias de NO₂ aumentam em clima futuro de forma acentuada. Contudo, este aumento acentuado não se verifica para as concentrações de ozono, cuja média sofre um crescimento de cerca de 26 %. Existem mesmo localidades, Fundão, Faro e Lamas de Olo, que em que a média das concentrações de ozono se mantém constante nos períodos simulados.

Tabela 6.7: Concentrações médias de O₃ e desvio padrão, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, por episódio simulado.

Localidade	Clima Actual		Clima Futuro	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Alandroal	57,2	7,6	64,6	27,3
Boavista	35,6	30,9	52,2	73,5
Chamusca	59,3	10,6	70,1	59,8
Entrecampos	39,4	36,2	84,7	86,5
Faro	52,9	12,9	52,6	40,0
Fundão	60,9	8,0	60,3	14,3
Lamas de Olo	60,4	11,7	59,8	15,4
Monte Velho	68,2	22,6	96,3	73,7
Teixugueira	54,9	20,6	75,8	65,8
Média episódio	54,3	17,9	68,5	50,7

Tabela 6.8: Concentrações médias de NO₂ e desvio padrão, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, por episódio simulado.

Localidade	Clima Actual		Clima Futuro	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Alandroal	0,6	1,3	2,8	3,8
Boavista	38,6	19,9	84,7	33,1
Chamusca	20,7	3,5	34,0	24,3
Entrecampos	47,3	21,0	52,2	29,3
Faro	7,9	6,7	36,6	22,0
Fundão	1,0	1,5	6,0	5,8
Lamas de Olo	2,1	2,4	7,1	5,4
Monte Velho	3,6	4,7	24,3	23,1
Teixugueira	11,8	11,0	33,7	26,7
Média episódio	14,8	8,0	31,3	19,3

Em termos de variabilidade de resultados, as simulações sugerem um aumento de variabilidade de concentrações em clima futuro. Esta tendência está patente nos gráficos de distribuição dos resultados de concentrações dos dois poluentes em questão na Figura 6.14 e na Figura 6.15, em clima actual e clima futuro.

Analisando a Figura 6.14 verifica-se que os locais mais afastados dos grandes centros urbanos de Lisboa e Porto, nomeadamente Faro, Fundão e Lamas de Olo, quase não sofrerão alteração nos valores de concentração de ozono num cenário futuro. Alandroal e Chamusca sofrerão um ligeiro aumento dos níveis de ozono. Os locais a Sul dos grandes centros urbanos, Teixugueira e Monte Velho, bem como as próprias cidades, poderão ser afectadas por acréscimos razoáveis de ozono, em que se chegarão quase duplicar os valores actuais e mesmo ultrapassar os 100% de aumento no caso de Lisboa.

Em cenário de clima futuro, identificam-se quatro regiões com valores de ozono superiores ao limiar de alerta à população, nomeadamente: Teixugueira, Monte-Velho, Entrecampos, e Boavista. A área que integra Chamusca ultrapassará o limiar de informação ao público. É interessante notar que, apesar dos valores máximos aumentarem substancialmente, o valor da mediana não aumenta consideravelmente em qualquer local em clima futuro, à excepção de Entrecampos.

As concentrações de ozono em clima actual ultrapassam o valor de limiar de informação ao público em Entrecampos. A estação de qualidade do ar localizada em Entrecampos é actualmente uma estação de tráfego, onde normalmente os valores medidos de ozono são baixos. A aparente contradição entre os valores medidos e os valores simulados deve-se possivelmente à baixa resolução da malha usada nas simulações com o modelo fotoquímico que não permite a simulação de fenómenos locais de consumo de ozono medidos nas estações de tráfego. Este tipo de resultados foi também obtido em estudos anteriores, recorrendo a diferentes sistemas de modelação de meso-escala (Monteiro *et al.*, 2005). Em Monte Velho e na Teixugueira estimaram-se valores médios de ozono mais elevados em clima actual, o que parece estar de acordo com as observações realizadas em Portugal (Borrego *et al.*, 2003a).

Em relação ao NO₂ (Figura 6.15), em todas as células de cálculo, a mediana da concentração aumenta em clima futuro, o que está relacionado com as emissões de NO_x consideradas (aumentam cerca de 360 %, em relação a valores de 1990). Na Boavista o máximo simulado ultrapassa o valor limite horário de protecção à população (200 µg.m⁻³). Chamusca e Monte Velho mostram uma maior dispersão dos valores de NO₂. Aprecia-se, tal como no caso do ozono, um aumento da variabilidade de concentrações produzidas pelo modelo fotoquímico em todas as localizações em análise.

Em clima actual, as simulações indicam valores de NO₂ inferiores ao valor limite, sendo os piores resultados estimados em Boavista e em Entrecampos. Estes resultados estão de acordo com a análise feita às medições horárias de NO₂ das estações fixas de monitorização, entre 1996 e 2000, em termos regionais, onde valores acima do valor limite horário se encontram em estações das aglomerações de Porto Litoral e Área Metropolitana de Lisboa Norte (IA, 2002b).

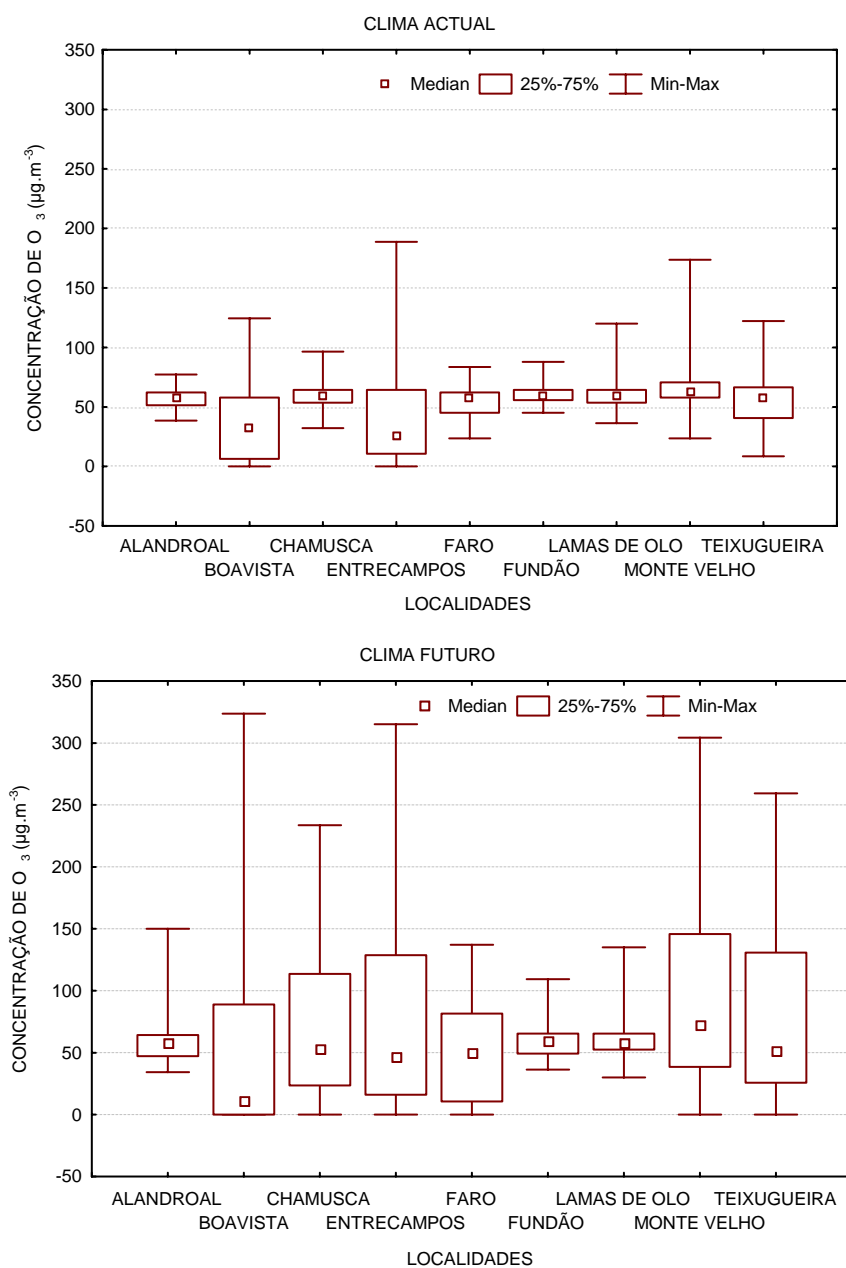


Figura 6.14: Mediana e quartis dos resultados de O₃ para os episódios de cenário climático actual e futuro.

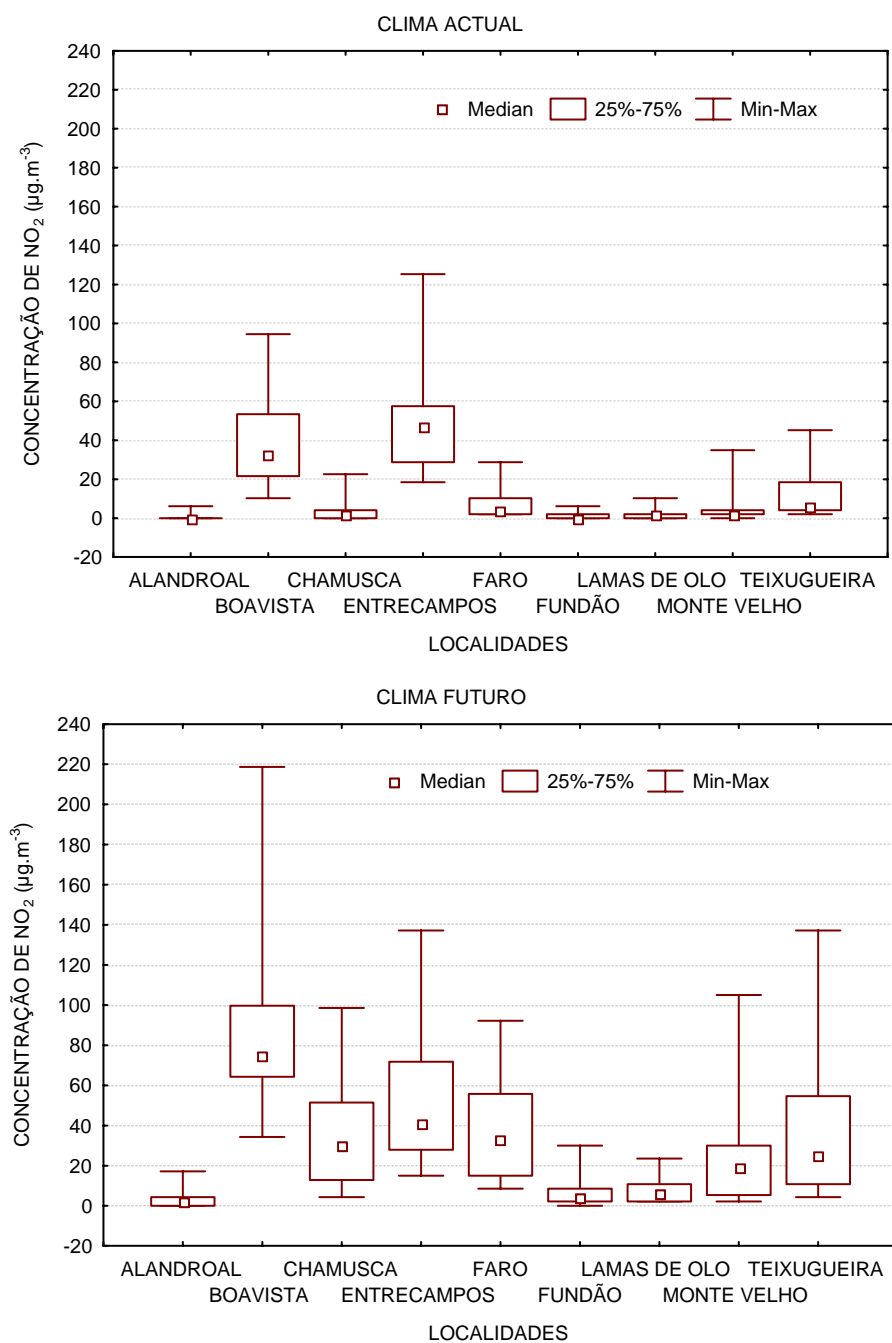


Figura 6.15: Mediana e quartis dos resultados de NO₂ para os episódios de cenário actual e cenário futuro.

Entre as 8H00 e as 22H00 UTC, com uma frequência de duas horas, calcularam-se as médias das concentrações de O₃ e de NO₂, para cada episódio simulado, em cenário de clima actual e cenário de clima futuro, para cada célula do domínio de aplicação do modelo fotoquímico. Os diferenciais de concentração de ozono e dióxido de azoto, nos períodos horários considerados, encontram-se representados na Figura 6.16 e Figura 6.17, respectivamente.

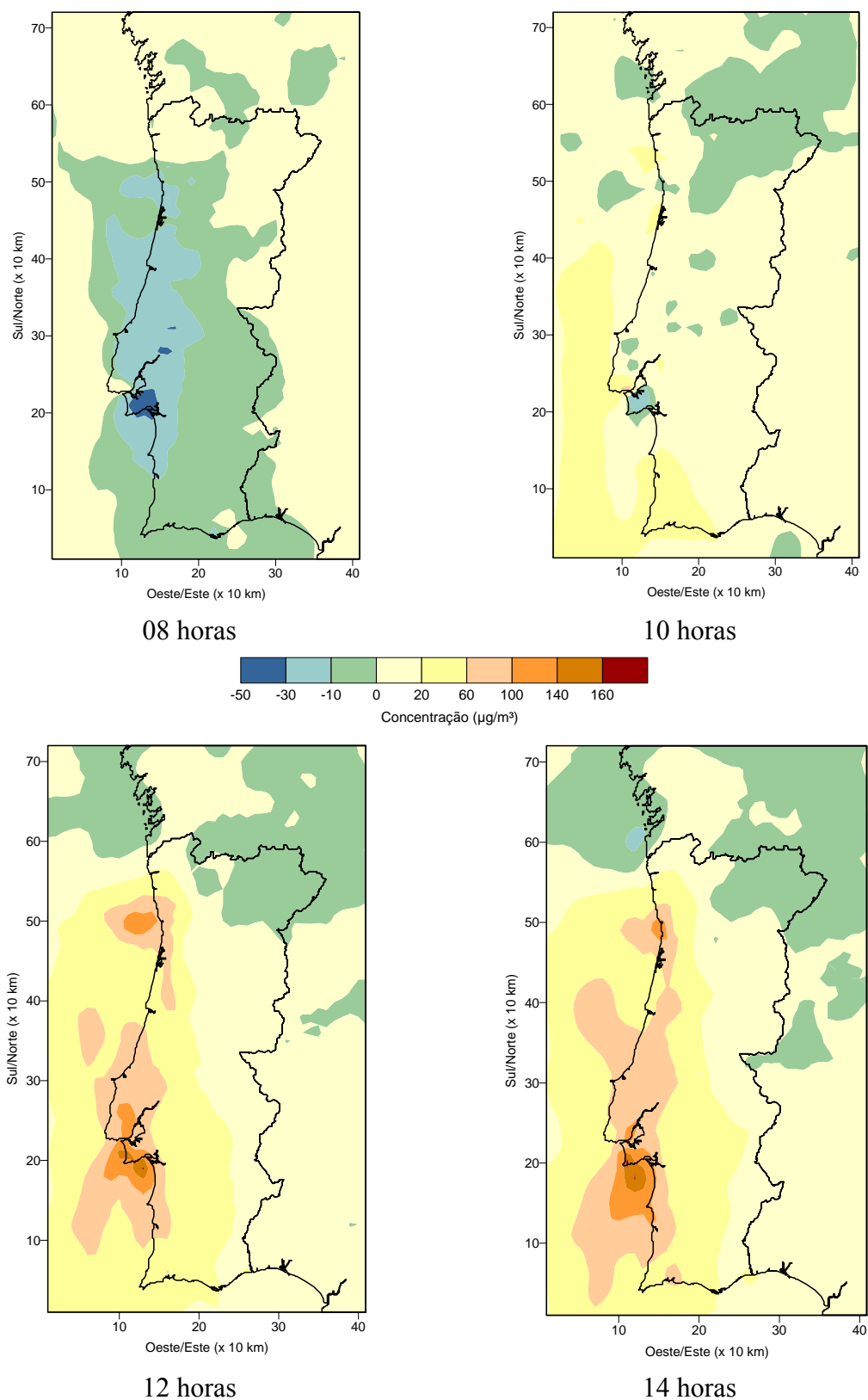


Figura 6.16: Mapas de diferenciais ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), entre cenário futuro e cenário actual, das médias horárias das concentrações simuladas de ozono.

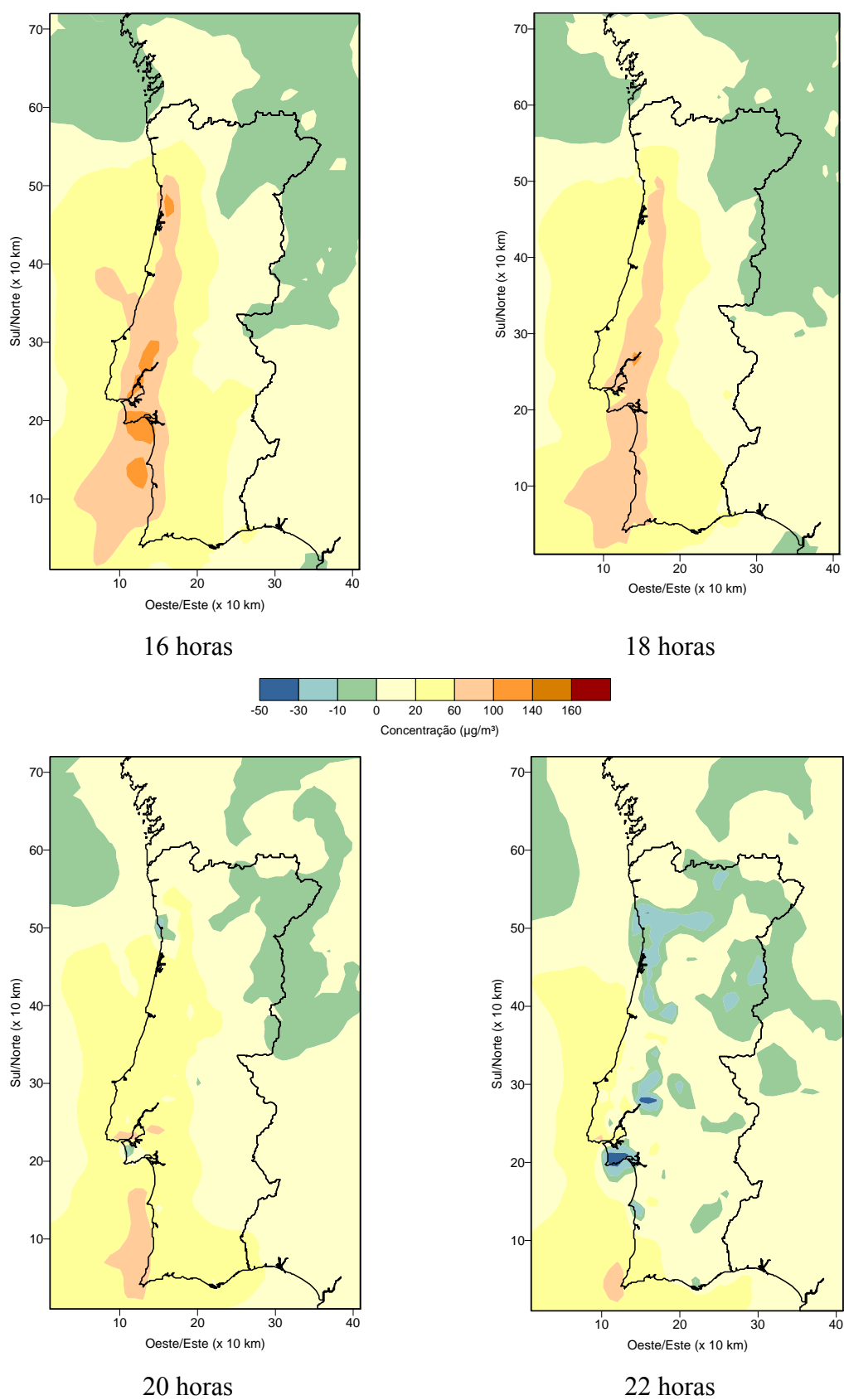


Figura 6.16: Mapas de diferenciais ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), entre cenário futuro e cenário actual, das médias das concentrações simuladas de ozono.

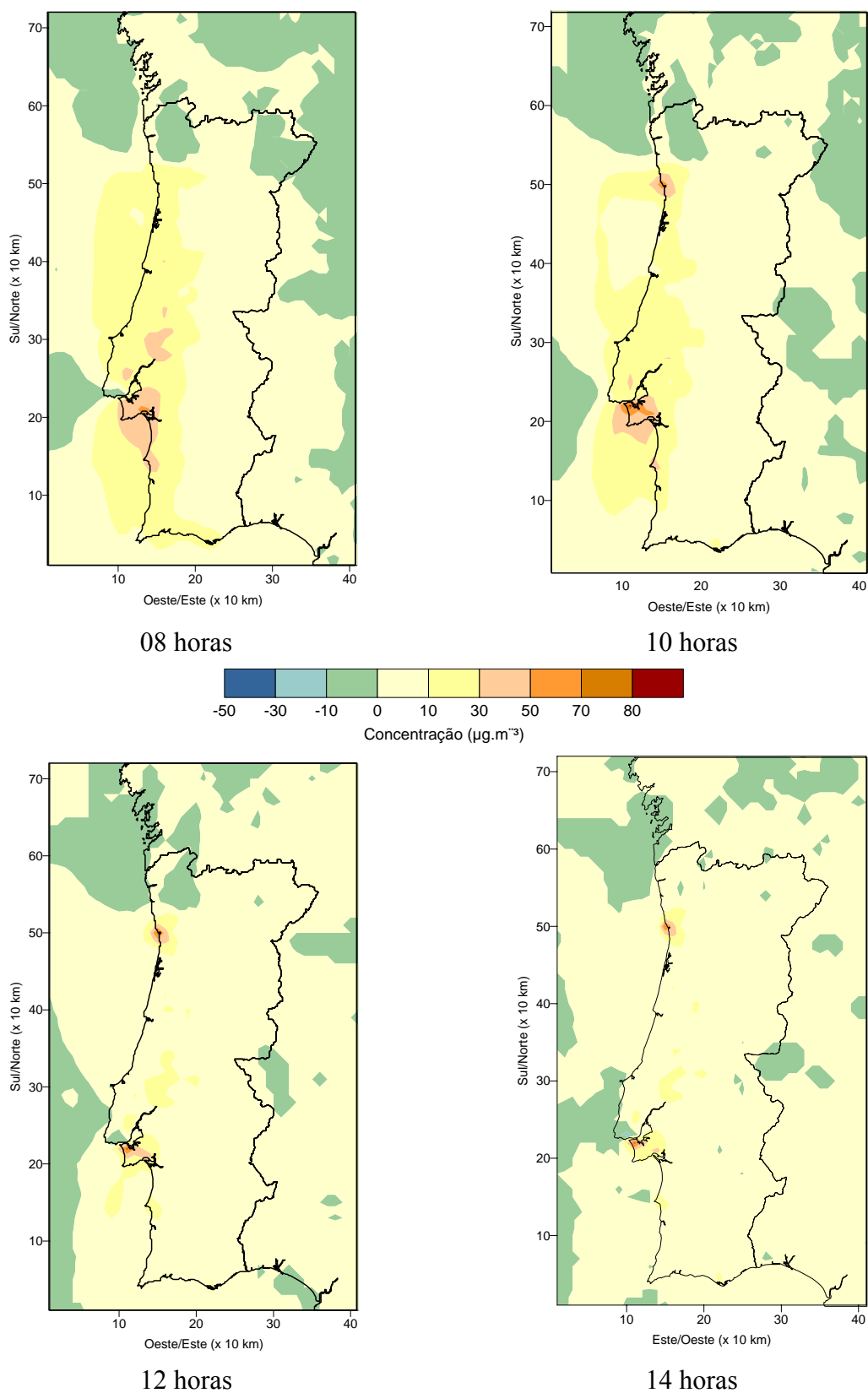


Figura 6.17: Mapas de diferenciais ($\mu\text{g.m}^{-3}$), entre cenário futuro e cenário actual, das médias das concentrações simuladas de dióxido de azoto.

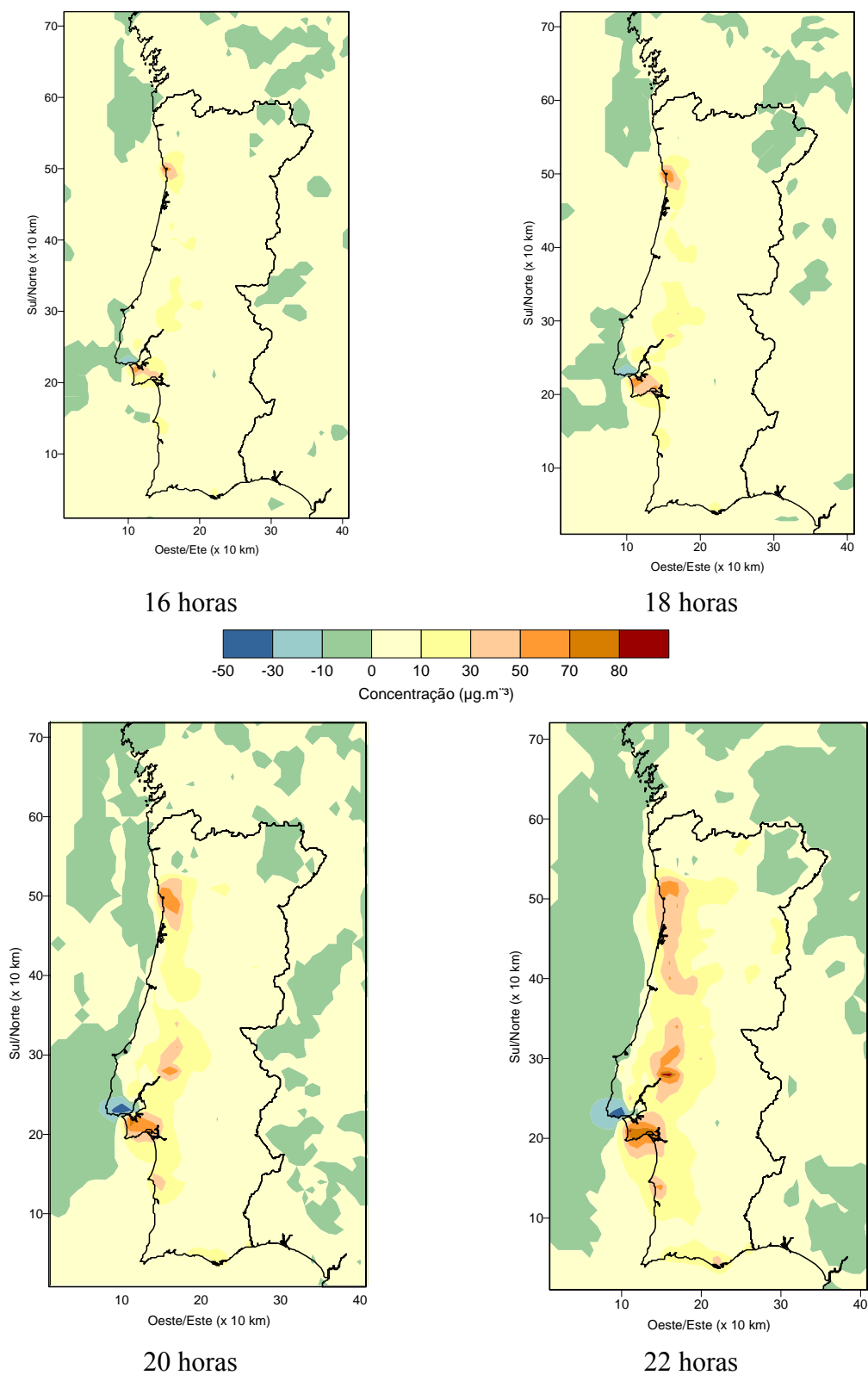


Figura 6.17: Mapas de diferenciais ($\mu\text{g.m}^{-3}$), entre cenário futuro e cenário actual, das médias das concentrações simuladas de dióxido de azoto.

Pela observação das figuras verifica-se uma diminuição da concentração de O_3 que chega a atingir cerca de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$, entre a cidade de Lisboa e a região de Setúbal, às 8H00 UTC, e em toda a zona litoral entre as 8H00 e as 10H00, e novamente entre as 20H00 e as 22H00 UTC. Esta diminuição de ozono pode ser explicada pelo aumento das concentrações de NO_x resultantes do aumento das emissões de NO_x , sobretudo no litoral, e consumo por esta espécie química quando as condições de insolação não são favoráveis à produção fotoquímica do O_3 . Todo o litoral sofre, entre as 10H00 e as 18H00 UTC, nas condições simuladas, um aumento de concentrações de ozono que poderão atingir diferenciais de $160 \mu\text{g.m}^{-3}$ sobre o mar, a Sul da Serra da Arrábida. Note-se que a região de Trás-os-Montes apresenta uma diminuição das concentrações de ozono para o mesmo período. Estas podem relacionar-se com os aumentos das concentrações de NO_2 de cerca de $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ verificadas na parte interior do país, ou seja, da mesma ordem de grandeza que a da diminuição de concentrações de ozono na mesma região. Contudo, a diminuição de ozono não se regista na restante parte interior do país. Esta região é a que se vê menos afectada pela pluma de ozono que se origina no litoral, sobretudo a Sul da região do Porto. Deve-se referir, no entanto, que as variações de emissões de poluentes na vizinha Espanha não foram consideradas nestas simulações, tendo sido mantida constantes em ambas as situações de simulação.

Em síntese, o modelo global dá, por si só, uma indicação de um possível agravamento na ocorrência de períodos em que as condições meteorológicas podem propiciar a formação de ozono fotoquímico. Estes períodos tendem a ser ligeiramente mais prolongados e com temperaturas mais elevadas em cenário de clima futuro.

A regionalização dos cenários de clima globais, feita através da cascata de modelos apresentada, permitiu verificar que os resultados do modelo fotoquímico indicam um aumento significativo das médias episódicas das concentrações de NO_2 que não se reflecte nas médias episódicas das concentrações de ozono de forma tão agravada.

Em termos das concentrações horárias, em clima futuro há a possibilidade de as ultrapassagens ao limiar de alerta à população aumentarem nas grandes áreas metropolitanas de Lisboa e Porto, assim como em regiões que normalmente são afectadas pelo penacho desenvolvido no transporte de precursores de ozono libertadas naquelas áreas, nomeadamente Teixugueira e Chamusca.

Devido ao aumento substancial das emissões de NO_x em cenário futuro, as concentrações de NO_2 mostram valores de concentrações mais elevados podendo o limiar legal horário de protecção à saúde humana ser ultrapassado mais facilmente nas regiões urbanas do país, nestas condições.

As séries horárias de concentração dos dois poluentes analisados apresentam uma maior variação dos seus valores em cenário futuro do que os simulados em cenário de actual.

6.2 *Impacte no índice meteorológico de risco de incêndio*

Tal como se mostrou no Capítulo 1, em certas situações há uma relação indubitável entre os incêndios florestais e a qualidade do ar gerada pelas emissões deles decorrentes. Por outro lado, como se terá oportunidade de verificar, há estudos que estabelecem relações entre certos índices de carácter meteorológico e as áreas ardidas. O conhecimento das emissões de compostos químicos resultantes da combustão do coberto vegetal permite prognosticar as concentrações de determinados poluentes presentes na atmosfera. Assim, as estimativas de índices meteorológicos de risco de incêndio em cenários de clima futuro poderá dar uma indicação de como a qualidade do ar se poderá ver afectada pela queima de biomassa.

Com base em estudos anteriores (Viegas *et al.*, 2004; Viegas *et al.*, 2000; Mata Reis, 1998) de comparação do desempenho de diversos métodos de estimativa do perigo de ocorrência de incêndios florestais e de avaliação global da severidade de um dado ano, seleccionou-se o Sistema Canadano de indexação de perigo de incêndio. O Sistema Canadano (Van Wagner, 1987), actualmente utilizado em Portugal e também noutros países da Europa, além de ser simples de calcular, a partir de parâmetros que são fáceis de obter por medição ou por estimativa através de modelos, proporciona um conjunto de indicadores com significados distintos que se tornam úteis para a avaliação da evolução das condições de perigo relacionadas com a meteorologia, nomeadamente as que possam ser induzidas por uma eventual mudança climática.

6.2.1 O índice meteorológico de risco de incêndio Fire Weather Index (FWI)

O índice Canadano de perigo de incêndio, Fire Weather Index (FWI), é calculado apenas com base em informação meteorológica, produzindo seis componentes que individual e colectivamente têm em conta o efeito das variáveis meteorológicas na ocorrência e comportamento do fogo. A estrutura do FWI encontra-se representada na Figura 6.18.

Os parâmetros meteorológicos que o FWI requer como dados de entrada são: a temperatura do ar, a humidade relativa do ar, a velocidade do vento (a 10 m de altura) e a precipitação ocorrida nas últimas 24 horas. Uma vez que o máximo diário de índice de perigo ocorre cerca do meio-dia, os parâmetros meteorológicos deverão ser os observados ou previstos para as 12H00 UTC. Para além do FWI, os parâmetros meteorológicos permitem calcular subíndices relacionados com o teor em humidade dos combustíveis e com o comportamento do fogo.

Subíndices de teor de humidade

O sistema FWI possui três subíndices para caracterizar o teor de humidade dos combustíveis mortos, divididos por três classes de tempo de resposta à variação do teor de humidade (Cruz, 2000):

- Índice de humidade dos combustíveis finos – FFMC: traduz o teor de humidade dos combustíveis finos situados na camada superior de manta morta. Como os incêndios florestais se iniciam e propagam nos combustíveis finos, este índice é um indicador da facilidade de ignição.

- Índice de humidade da camada orgânica – DMC: é um indicador do teor de humidade da camada orgânica de manta morta de profundidade moderada (5 a 10 cm) e pouco compacta. Devido à sua localização, estes combustíveis apresentam uma velocidade de secagem mais lenta que os combustíveis finos superficiais. Este subíndice é de grande importância no planeamento de fogos controlados de forma a minimizar os efeitos do fogo no solo.
- Índice de secura – DC: caracteriza o teor de humidade das camadas de combustível compactas e/ou profundas (10 a 20 cm). Os combustíveis do estrato em questão possuem uma velocidade de secagem bastante lenta, pelo que a precipitação ocorrida no Inverno é crítica no cálculo dos valores iniciais de DC. Este índice pode ser usado para caracterizar a probabilidade de ocorrência de fogos subterrâneos e a dificuldade de rescaldo.

Estes três subíndices, que formam a base do sistema, são cumulativos, incorporando o efeito das condições meteorológicas passadas e presentes. Os três subíndices de teor de humidade são constituídos por duas fases - humedificação e secagem dos combustíveis - de forma a acompanhar o efeito das condições meteorológicas nestes dois processos. Os subíndices reagem com diferentes tempos de resposta às mudanças ocorridas nas variáveis meteorológicas, aplicando-se a estratos combustíveis diferentes.

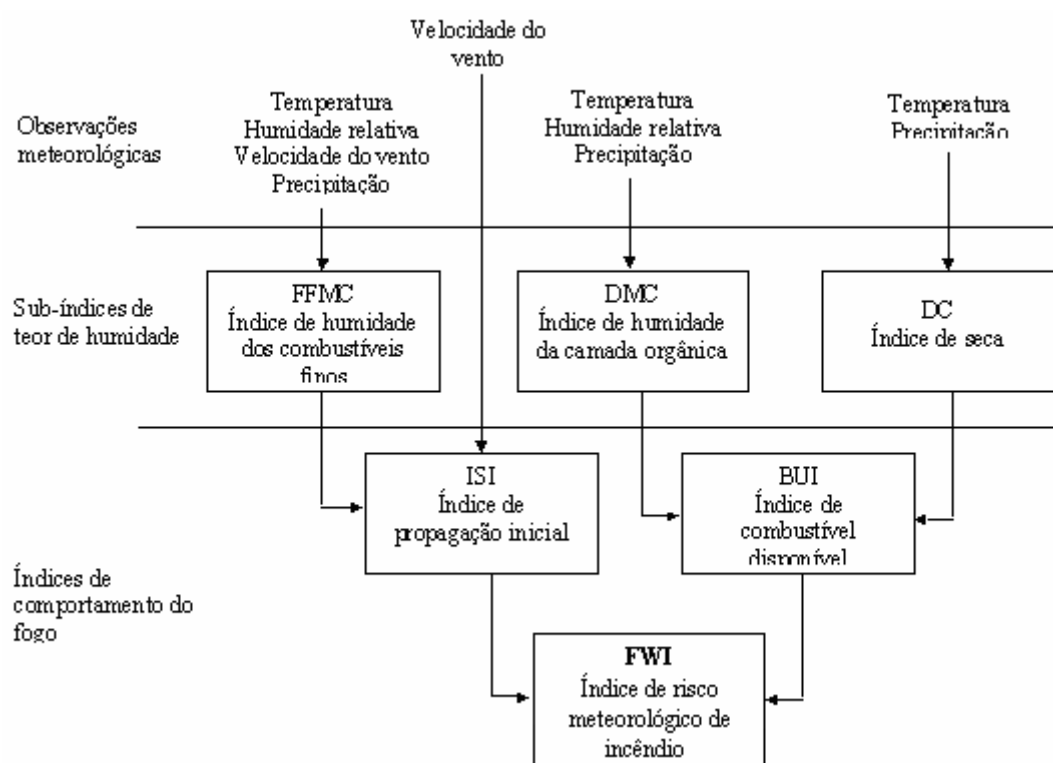


Figura 6.18: Estrutura do sistema Canadense de indexação de perigo de incêndio (Viegas *et al.*, 2004).

Subíndices de comportamento do fogo

No nível intermédio do sistema de indexação encontram-se dois índices relacionados com aspectos de comportamento ou propagação do fogo:

- Índice de propagação inicial – ISI: incorpora o FFMC e o valor da velocidade do vento para produzir uma medida da velocidade de propagação do fogo em terreno plano. Este índice é denominado de inicial devido ao facto de outros factores, tais como a carga de combustível, o tipo de incêndio e a projecção de partículas em combustão, terem grande influência na velocidade de propagação do incêndio.
- Índice de combustível disponível – BUI: integra os índices DMC e DC para obter uma estimativa do combustível total disponível que irá participar efectivamente na propagação

Índice de perigo

O resultado final do sistema é uma conjugação dos dois índices anteriores, designada por *Índice de Perigo – FWI*. Pelo facto de integrar o ISI e o BUI, o FWI constitui simultaneamente uma boa medida de facilidade de ignição (relacionada com o teor de humidade dos combustíveis finos), da extensão possível dos incêndios (dependente da velocidade de propagação) e da dificuldade de extinção, proporcional à intensidade de propagação (Viegas *et al.*, 2004).

Calibração e classes de perigo

A calibração de um índice de perigo para uma dada região pretende que a cada classe de índice de perigo corresponda um nível de potencial de propagação de incêndios florestais. A Tabela 6.9 apresenta as classes de perigo definidas de acordo com a área máxima consumida por incêndio.

Tabela 6.9: Classes de perigo e área máxima consumida por incêndio (Cruz, 2000).

Classe de perigo de incêndio	Área máxima atingida por incêndio (ha)
Baixo	< 1
Moderado	1 – 3
Alto	3 – 25
Muito alto	25 – 500
Extremo	> 500

Num estudo previamente realizado (Cruz, 2000) com base em dados históricos nacionais, foram definidas as classes de perigo de incêndio para os diversos componentes do sistema FWI para Portugal (Tabela 6.10).

Num estudo recente (Viegas *et al.*, 2004), o FWI foi calibrado para diferentes distritos nacionais (Tabela 6.11), tendo em conta dados históricos de número de ocorrências e área

ardida, e também a especificidade de cada distrito. Os distritos do Porto, Coimbra e Évora tipificam algumas das diversas situações encontradas no país.

Tabela 6.10: Classes de perigo e limites de classe para cada componente do FWI (Cruz, 2000).

Classe de perigo	Componentes do sistema FWI					FWI
	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	
Baixo	0 - 81	0 - 19	0 - 78	0 - 1,9	0 - 23	0 - 3
Moderado	82 - 87	20 - 84	78 - 505	2 - 4,9	24 - 115	4 - 17
Alto	88 - 89	85 - 143	506 - 743	5 - 7,9	116 - 180	18 - 27
Muito alto	90 - 92	143 - 187	744 - 882	8 - 11,9	181 - 224	28 - 38
Extremo	> 93	> 188	> 883	> 12	> 225	> 39

Tabela 6.11: Valores limite das classes de perigo para os distritos de Porto, Coimbra e Évora (Viegas *et al.*, 2004).

Classe de perigo	FWI		
	Porto	Coimbra	Évora
Baixo	8	17	36
Moderado	19	23	47
Alto	24	29	65
Muito Alto	39	46	75

Assim, os valores limite das classes de perigo apresentados na Tabela 6.10 são de aplicação geral a Portugal, enquanto os da Tabela 6.11 são específicos para os distritos considerados, verificando-se, por exemplo, que um valor de FWI de 30, considerado como indicador de perigo muito alto em termos médios nacionais, poderá apontar para uma classe de perigo baixa no distrito de Évora e alta nos distritos do Porto e de Coimbra.

6.2.2 Previsões do índice meteorológico de risco de incêndio

Numa primeira abordagem, foi dada uma atenção especial ao índice de secura (DC), devido à simplicidade associada ao seu cálculo e à possibilidade de poder ser estimado directamente a partir dos resultados da simulação global. Acresce o facto de estudos realizados em Portugal terem permitido verificar que o DC é um bom indicador da propagação e comportamento do fogo (Cruz, 2000), e do perigo relativo de uma época de

incêndios (Viegas *et al.*, 2004). Assim, o índice DC foi seleccionado como um primeiro indicador meteorológico que permite avaliar o impacte das alterações climáticas no risco de incêndio.

Os resultados do MUGCM, para clima presente, foram usados para calcular o DC para as duas células de computação localizadas sobre Portugal. Cada célula corresponde a uma área de 320 km x 250 km, cobrindo o centro (C1) e o norte de Portugal (C2), Figura 6.19.

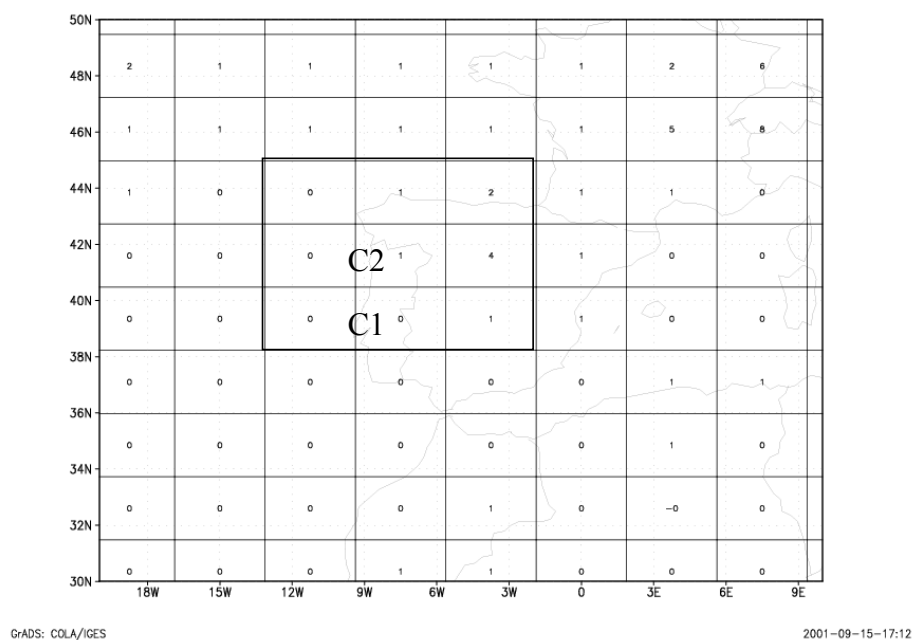


Figura 6.19: Localização das células do modelo global MUGCM usadas no cálculo do DC.

De modo a avaliar os valores de DC estimados através dos resultados do MUGCM, foi efectuada uma comparação com os valores de DC calculados a partir de parâmetros meteorológicos medidos na estação do Instituto de Geofísica em Coimbra, de 1988 a 2001. Os valores de DC resultantes desta estação meteorológica e as ocorrências de fogos em Portugal apresentam uma boa correlação (Viegas *et al.*, 2004). A comparação das duas séries de dados (média e desvio padrão) é apresentada na Figura 6.20. Os valores referentes aos cálculos de DC com base nas simulações resultam de médias de 30 anos e os valores calculados com base nos dados meteorológicos medidos resultam de médias de 14 anos.

Comparando os resultados das simulações de controle com os valores calculados para o conjunto dos 14 anos disponível para Coimbra, constata-se que as curvas de evolução seguem a mesma tendência crescente até meados de Setembro e que a variabilidade é maior nos meses de Verão. No entanto, os valores estimados através da modelação climática global são superiores aos valores medidos para Coimbra. O desvio padrão da distribuição das médias, calculado para Coimbra, tende também a ser superior.

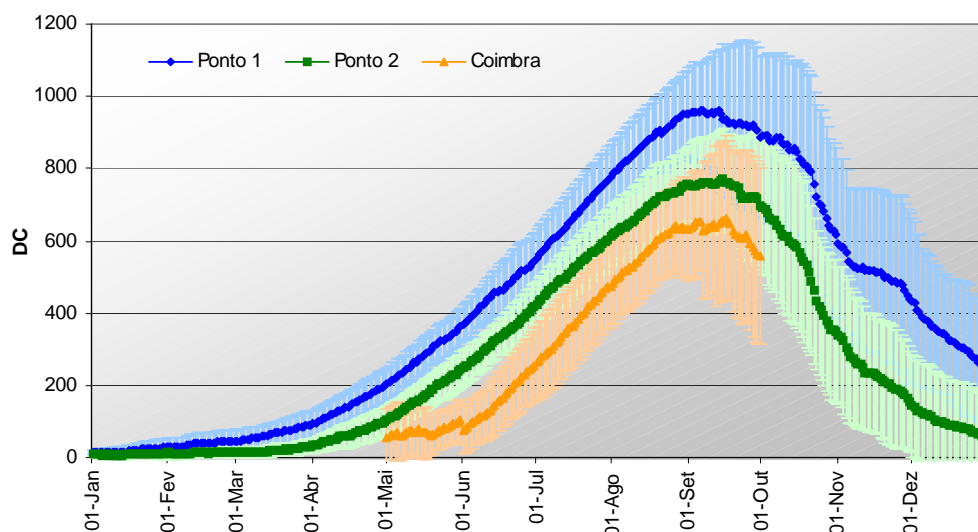


Figura 6.20: Média e desvio padrão dos índices DC calculados para Coimbra e simulados pelo MUGCM para o cenário climático actual.

A sobre-estimativa do DC pode dever-se a uma deficiente consideração da componente de precipitação, uma vez que os valores estimados por simulação tendem a ser sistematicamente superiores aos calculados com base em dados meteorológicos medidos, ou à variação espacial do DC. Deve-se referir que os valores estimados para o ponto 2 se assemelham mais com os valores calculados para Coimbra, nomeadamente no que se refere à média. Como se pode avaliar pela observação da Figura 6.20, existe uma diferença considerável entre os valores de DC nas duas células contíguas do modelo MUGCM.

6.2.3 Selecção dos períodos de interesse a simular

De modo a tentar melhorar os valores de DC anteriormente calculados, recalculou-se novamente este subíndice sobre a célula 2, ou seja a célula do modelo global que tinha apresentado os melhores resultados em comparação com os valores medidos (na secção anterior, Figura 6.20). Nesta nova simulação, o valor de DC obtido no final (31 de Dezembro) da simulação anterior foi utilizado para iniciar o valor de DC na nova simulação. Os resultados obtidos para as simulações de clima actual e clima futuro são apresentados na Figura 6.21 e Figura 6.22, respectivamente.

A análise das Figuras permite verificar diferenças significativas entre as simulações de controlo (cenário presente) e de perturbação (cenário futuro): enquanto nas simulações de controle existe um pico bem definido (no final do mês de Setembro), nas simulações de perturbação tal não acontece, verificando-se uma tendência decrescente do índice, mas uma variabilidade significativa dos seus valores, sendo atingidos valores de DC bastante elevados durante um maior período após o mês de Setembro.

Conjugando estes elementos com a informação resultante da análise estatística efectuada aos resultados do MUGCM (Miranda *et al.*, 2004) identificou-se como o período de maior

interesse para a realização do *downscaling* dinâmico os meses de Fevereiro a Outubro, inclusive.

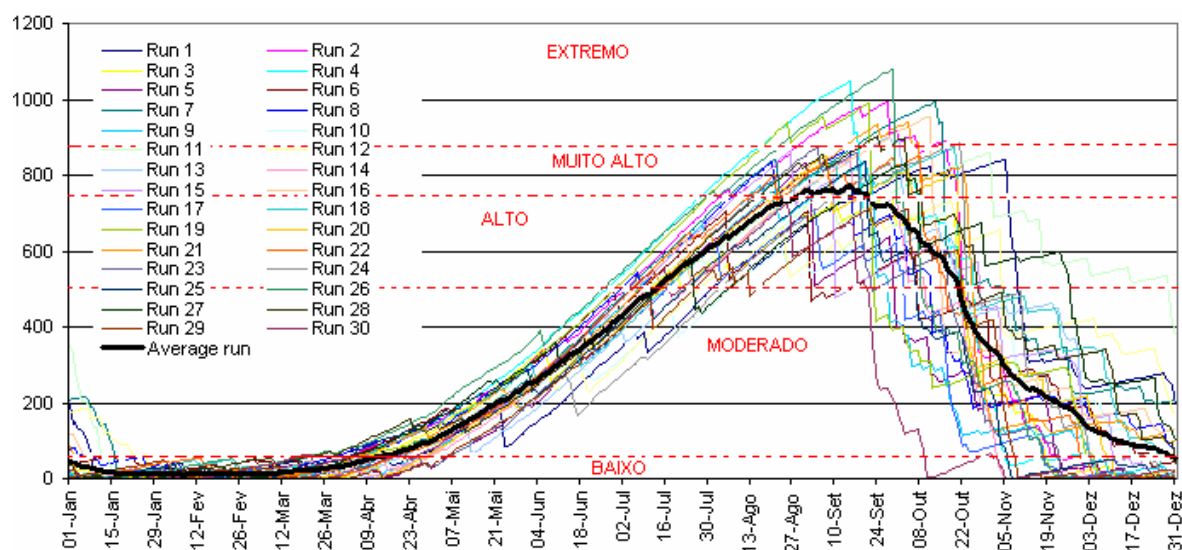


Figura 6.21: Estimativa do DC para o clima actual.

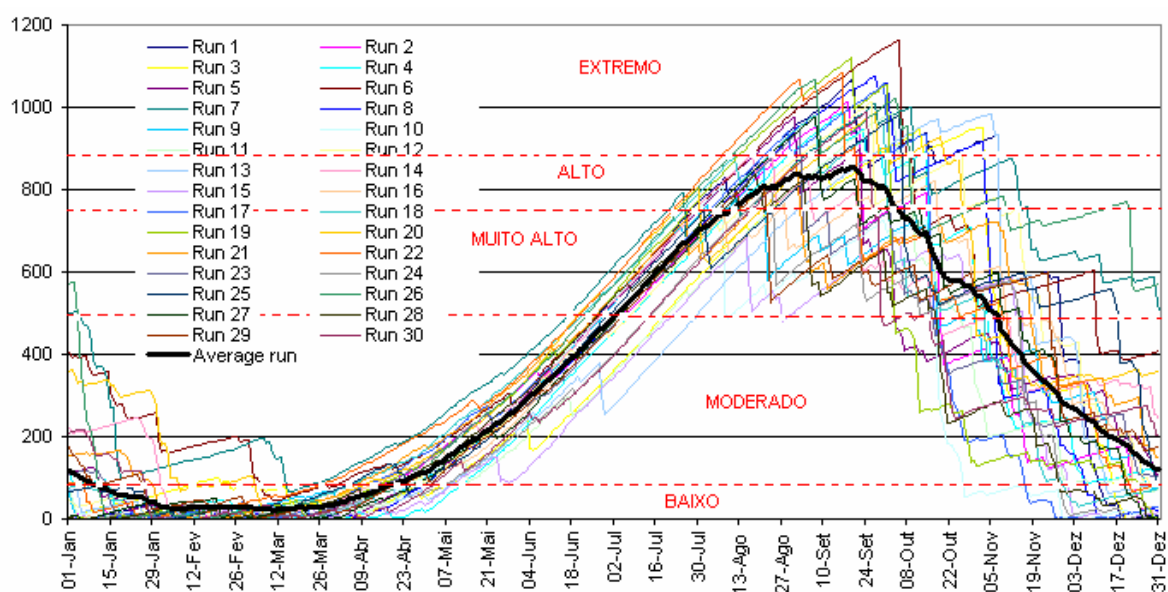


Figura 6.22: Estimativa do DC para o clima futuro.

Procedeu-se à selecção de uma simulação representativa da média das simulações realizadas para cada clima. A Figura 6.23 e a Figura 6.24 mostram as simulações seleccionadas para cada clima.

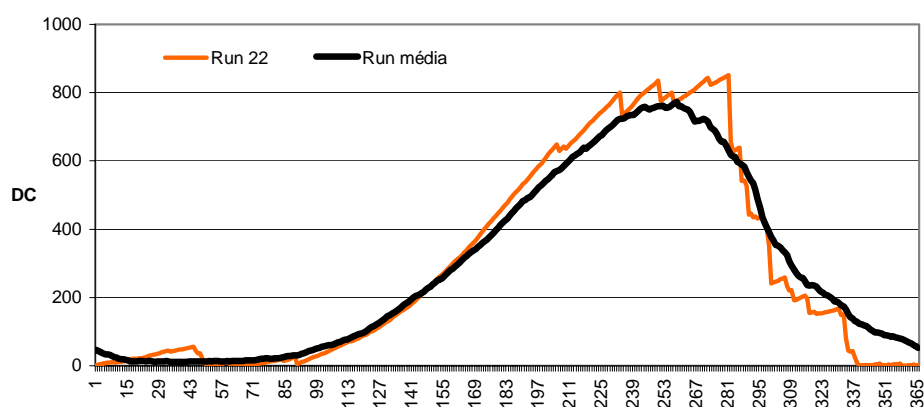


Figura 6.23: Simulação seleccionada como representativa da média do clima presente.

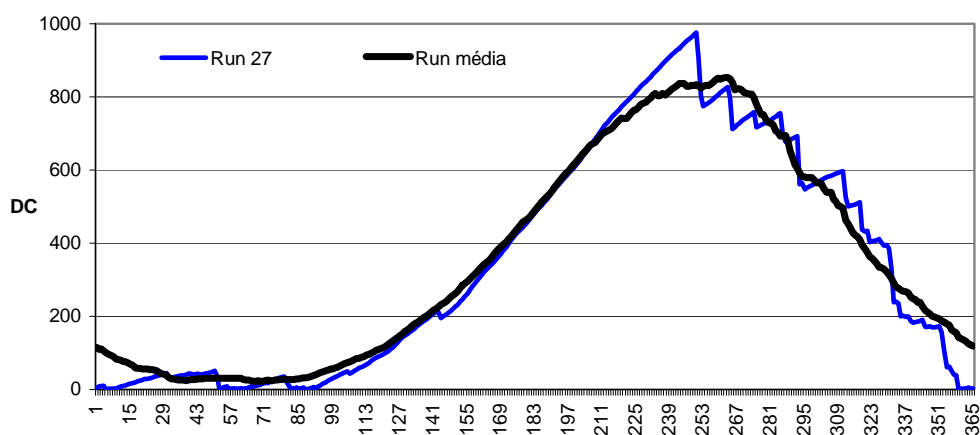


Figura 6.24: Simulação seleccionada como representativa da média do clima futuro.

Assim, os resultados das simulações 22 e 27 para o clima presente e clima futuro, respectivamente, foram considerados como representativos das 30 simulações anuais realizadas para cada cenário, sendo utilizados como condições iniciais e fronteira no modelo meteorológico MM5.

6.2.4 Estimativa do FWI para clima actual e clima futuro

Aplicou-se a técnica de *downscaling* dinâmico às duas simulações representativas dos dois cenários climáticos em análise, tendo sido simulados oito meses – de Fevereiro a Outubro, em cada um deles.

Desenvolveu-se um módulo de cálculo do FWI, em grelha, que considera os valores de temperatura, humidade relativa, velocidade do vento (a 10 metros) e temperatura (a 2 metros) calculados pelo MM5 às 12H00 UTC, sobre o domínio de maior resolução (Figura 5.7).

Seleccionou-se a estação meteorológica de Coimbra de modo a avaliar o possível impacto local duma alteração climática no índice meteorológico de risco de incêndio em Portugal Continental, e as possíveis implicações na área ardida. As razões em que se baseia esta escolha estão relacionadas com a disponibilidade de dados históricos, tanto meteorológicos como de estimativa do FWI e subíndices, nomeadamente do DC. Mas mais importante é, talvez, o facto de o cálculo do DC para Coimbra dar uma boa indicação das áreas ardidas em Portugal. Num estudo realizado por Viegas e Viegas (1994), incluindo 24 estações meteorológicas do centro de Portugal, verificou-se que a precipitação registada na estação de Coimbra, no período compreendido entre 1975 e 1990, apresenta coeficientes de correlação com a área ardida superiores a 0,9, tanto no que respeita à precipitação entre Janeiro e Abril, como à registada entre Junho e Setembro. Num trabalho posterior, Viegas *et al.* (2004) mostrou a existência de uma relação exponencial entre a área ardida em todo o país e o DC calculado para a estação meteorológica de Coimbra, com um coeficiente de correlação elevado ($r^2=0,688$). A boa correlação apresentada parece estar relacionada também com o facto da região centro pesar para a área total ardida no País em cerca de 70 %, entre os anos de 1975-1990 (Viegas e Viegas, 1994).

Realizaram-se testes no sentido de verificar a importância do aumento da resolução temporal e espacial nos valores de DC, em Coimbra, tendo-se verificado um aumento dos valores deste índice quando calculados com base nos resultados do MM5 quando comparados com os resultantes do cálculo usando os resultados do modelo MUGCM. As séries deste índice obtidas em cenário de clima actual e de clima futuro foram comparadas, tal como anteriormente, com os valores obtidos com base em observações, entre 1988 e 2002 (Figura 6.25). A cascata de modelos MUGCM-MM5 produz resultados em clima actual que sobrestima os valores de DC calculados com base em observações, prolongando os seus valores elevados no tempo. Contudo, é notório entre um aumento de severidade deste índice entre as previsões de clima futuro e as de clima actual, sobretudo entre meados de Abril e o final de Agosto.

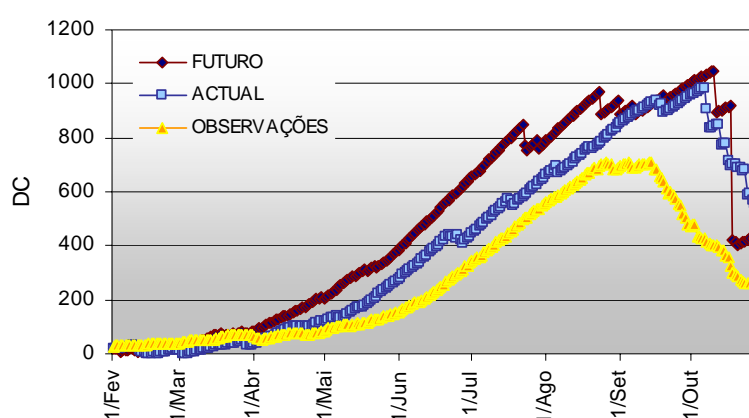


Figura 6.25: Evolução do DC para as séries obtidas pelo modelo MM5 e comparação com valores baseados em observações.

Com os resultados do modelo regional obtiveram-se duas séries de dados resultantes do cálculo de todos os subíndices do sistema canadiano: FFMCI, DMC, DC, ISI, BUI e FWI.

Estas séries foram estudadas quanto à sua distribuição por diferentes classes respeitantes a cada índice. Na Figura 6.26 apresentam-se os histogramas das seis componentes do índice canadiano. No geral, verifica-se uma tendência para valores das componentes do índice em classes de maior perigosidade, tanto por estimativa do cenário futuro como actual, à excepção de um índice de humidade nos combustíveis – o DMC e consequentemente num índice de comportamento do fogo - o BUI, e que na situação actual não se observam. Os índices que representam o teor de humidade nos combustíveis de resposta mais rápida, o FPMC e o DMC, apresentam distribuições de frequências absolutas unimodais assimétricas, tanto para os resultados das simulações como para os índices construídos com os dados observados. No caso do DC a distribuição não é tão clara, o que se poderá explicar pelo seu carácter mais lento na resposta a variações de humidade nos combustíveis, e apresentar desta forma as variações sazonais que contém.

Ainda em relação aos índices de humidade dos combustíveis, pode observar-se que em cenário de clima futuro, as distribuições de frequências apresentam valores que não se verificam nas séries históricas calculadas para estes índices, em Coimbra. Este aumento de classes nos valores dos índices faz com que o valor das frequências relativas diminua em algumas classes de maior humidade, e, portanto de menor valor do índice, no caso do DMC e DC, e aumente em classes de maior valor de índice e menor teor de humidade como é o caso do FPMC, que representa o teor de humidade dos combustíveis finos mortos, os quais têm um papel muito importante na propagação dos incêndios.

No que se refere aos índices de comportamento do fogo ISI e BUI, as frequências dos seus valores distribuem-se por um maior número de classes em cenário de clima futuro. A maior diferença entre as distribuições para o índice ISI é o aumento de frequências de valores baixos e uma diminuição de frequências para os valores de classes intermédias. A distribuição do BUI aumenta em mais três classes de valores em cenário de clima futuro em relação às observações realizadas, o que seria de prever dado ter surgido este efeito na distribuição do DMC, e da sua influência no cálculo do BUI. Por fim, o FWI indica uma distribuição bi-modal, com frequências absolutas elevadas na classe mais baixa de FWI, devido ao peso que o ISI e do BUI apresentam nesta classe. Em Coimbra, o cenário de clima futuro apresenta como a segunda maior frequência de ocorrências de FWI, a classe compreendida entre os valores 20-25 que, pela Tabela 6.11 indica perigo moderado a alto. Os valores de FWI calculados com base em observações mostram esta classe como uma das mais frequentes. Contudo, as duas classes mais baixas de FWI são as que apresentam as maiores ocorrências, reflectindo a influência sazonal deste índice. Em cenário de clima futuro diminuem as frequências de ocorrência para as duas classes de valores mais baixos de FWI, e aumenta o número de classes de FWI possíveis.

O agravamento da secura durante os meses de Inverno pode conduzir a um aumento da área ardida durante a época estival e portanto ao empobrecimento da qualidade do ar nas regiões sob a influência de uma pluma fotoquímica resultante de um incêndio. Como se referiu anteriormente, o valor de DC parece estar relacionado com a área ardida. Assim, calcularam-se os valores máximos destes índices em cada célula da malha, em cenário de clima actual e futuro. As simulações realizadas indiciam um agravamento dos extremos

deste índice nas regiões do interior do país, sendo mais agravado nas regiões do Alentejo e Algarve.

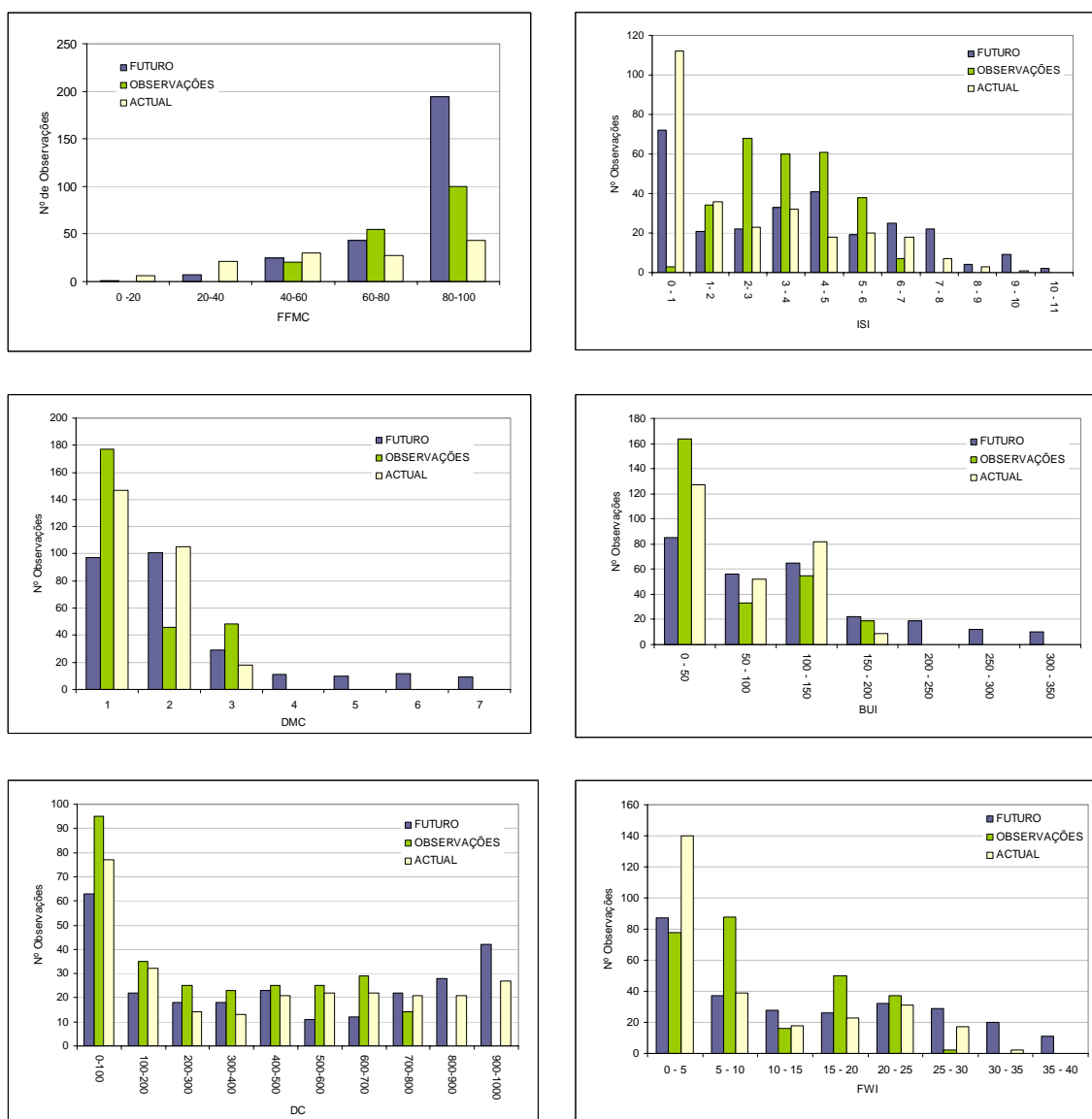


Figura 6.26: Histogramas das componentes do índice Canadano.

Em síntese, as simulações realizadas com o modelo MUGCM apontam para um aumento da época propícia a incêndios florestais em cenário de clima futuro para os meses de Junho e Julho, enquanto em clima actual esse período está centrado apenas no mês de Julho. O aumento da resolução temporal e espacial dos resultados do modelo MUGCM, através do *downscaling* dinâmico, permitiu uma afinação no cálculo de todos os componentes do índice meteorológico de risco de incêndio canadano. Em especial no subíndice DC que ao apresentar uma relação estreita com a área ardida permite inferir um possível agravamento das concentrações de poluentes gasosos devido à queima de biomassa em incêndios florestais em clima futuro.

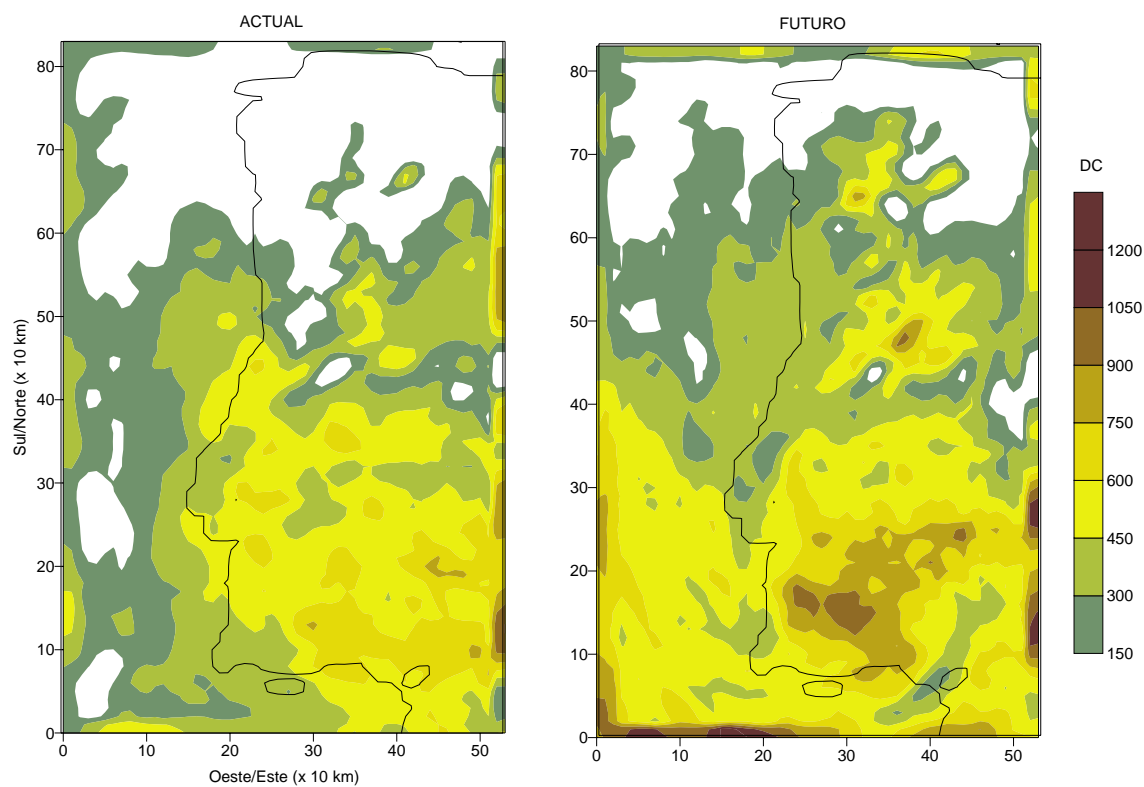


Figura 6.27: Valores de DC máximos em cenário de clima actual e de clima futuro.

Capítulo 7

7 Conclusões

Ao longo deste trabalho procurou-se evidenciar que a Natureza e as sociedades humanas produzem compostos gasosos que modificam, quantitativa e qualitativamente, a composição química da atmosfera. Estas alterações podem induzir variações climáticas com consequências em diferentes pontos do globo, a várias escalas espaciais e temporais, expressas com magnitude diferentes. Como se fez notar, a grande complexidade do sistema climático torna quase impossível determinar relações directas de causa e efeito e, por esta razão, o estudo das variações do clima e as suas implicações económicas e sociais baseia-se sobretudo na aplicação de modelos numéricos globais.

O ozono é um dos constituintes da atmosfera que influencia positivamente o balanço radiativo em termos globais e para o qual a distribuição e concentrações se têm vindo a alterar com o tempo, tanto na estratosfera como na baixa troposfera. Junto à superfície, e devido à sua influência na saúde humana, este é um dos constituintes atmosféricos que se encontra regulamentado em muitos países. Contudo, o controlo das concentrações ao nível do solo é extremamente difícil de conseguir devido ao facto de ser um poluente secundário e ao carácter regional da sua formação e dos seus efeitos.

Este trabalho pretendeu analisar, de forma integrada, as tendências das concentrações de ozono à superfície e de alguns dos seus precursores, os mecanismos dinâmicos de grande escala aos quais se possam atribuir fluxos positivos de ozono estratosférico na baixa troposfera e a estimativa das concentrações deste oxidante em cenário climático e de emissões em meados do Século XXI (análise centrada no ano 2050).

Em termos de concentrações médias de poluentes, calculadas para o dia Juliano, verificou-se que, na generalidade das estações de qualidade do ar de Portugal analisadas, os precursores de ozono apresentam diminuições das suas concentrações no final da Primavera e no Verão. Os padrões de ozono evidenciam um aumento, em geral abrupto, das concentrações médias para cada um dos dias Julianos no final do Inverno e no princípio da Primavera. As concentrações mais elevadas verificam-se, sobretudo no final da Primavera, havendo casos em que se mantêm no Verão. Verifica-se ainda que as concentrações de ozono são mais elevadas nas estações do Sul do País.

As estações de qualidade do ar analisadas neste trabalho mostraram ainda que há tendências lineares positivas nas concentrações de ozono. Este crescimento está acompanhado de uma diminuição das concentrações de CO resultantes da limitação de emissão impostas pelos padrões EURO 2 e 3. No que se refere às tendências nos

precursores azotados de ozono, não se observou qualquer tipo de tendência significativa. Estes valores indicam que Portugal segue os padrões encontrados para o Hemisfério Norte, nomeadamente nos estudos feitos nos Estados Unidos da América, Canadá, Japão e na Europa, tanto no que se refere ao aumento das concentrações de ozono no tempo como à diminuição de concentração dos seus precursores.

Os registos históricos horários de ozono permitiram isolar várias componentes associadas a escalas de tempo determinantes nas variações das concentrações de ozono: componente intradiurna, diurna, sinóptica, sazonal e a componente de longo prazo. Esta metodologia foi aplicada pela primeira vez neste trabalho a registos de ozono tão extensos, permitindo avaliar as tendências nas concentrações deste poluente. As séries de longo prazo resultantes deste estudo confirmam as tendências crescentes obtidas na análise linear das concentrações de ozono. Por outro lado, a variabilidade associada a cada uma das componentes permite verificar a classificação das estações quanto ao tipo. Deste estudo ressalta uma diferença na escala dos fenómenos que dominam as séries de ozono a Norte e a Sul do País. A variabilidade associada à componente sazonal tem menor importância nas estações do Norte e Centro quando comparadas com as do Sul do país. Por outro lado, existe a indicação de haver frequências a influenciar a oscilação das concentrações de ozono nestas zonas a serem determinadas. Verificou-se que as estações urbanas apresentam um peso relativo importante das componentes intradiurna e diurna, o que se esperaria já que estas componentes estão associadas a variações mais localizadas das emissões e fenómenos meteorológicos com ciclos inferiores a um dia e ao ciclo diário de radiação. Todavia, sobressaiu o facto de que as estações rurais do Norte e Centro do país apresentam o mesmo comportamento, o que parece indicar que estas estações se encontram muito influenciadas por este tipo de fenómenos.

Um dos temas fundamentais abordados neste trabalho consistiu no estudo de fenómenos dinâmicos que pudessem justificar concentrações de ozono em superfície. O recurso à correlação entre as concentrações de ozono e seus precursores, e a estabilidade atmosférica mostrou ser importante para provar que os fenómenos dinâmicos poderão ser uma fonte importante de ozono em superfície durante os meses que incluem o final do Outono, o Inverno e o princípio da Primavera. Os resultados de correlação são apenas estatisticamente significativos para este período para o ozono e precursores azotados, enquanto que para o CO é possível obtê-los em qualquer mês. Adicionalmente, o ozono correlaciona-se positivamente com situações de instabilidade e baixas pressões em superfície, enquanto que os compostos azotados se correlacionam positivamente com situações de estabilidade. A conjugação desta informação conduz à suposição de que o aumento das concentrações de ozono no Outono/Inverno/Primavera poderá estar relacionada com a passagem de sistemas frontais sobre Portugal, enquanto que as concentrações de compostos azotados se relaciona com situações de maior estabilidade vertical.

Os resultados obtidos anteriormente mostram como o estudo da dinâmica da atmosfera associada a episódios de intrusão de ozono estratosférico na baixa troposfera se revela muito importante para a compreensão de registos de concentrações deste poluente anormalmente elevadas. Os modelos meteorológicos surgiram como uma metodologia de

estudo deste tipo de fenómenos que, apesar de não ser original, nunca foi aplicada a episódios ocorridos no nosso país, e desta forma melhorar a compreensão de todo o processo em análise. Os resultados obtidos mostram que, embora os padrões de pressão em superfície possam ser variados, a atmosfera média está dominada por sistemas de vale. A importância deste processo em cenários climáticos futuros parece vir a ser crescente já que se prevê a recuperação das concentrações de ozono na estratosfera e um aumento do fluxo de ozono descendente na atmosfera (UE, 2003).

Este trabalho foi pioneiro em Portugal na sua abordagem ao estudo das implicações de possíveis alterações climáticas na qualidade do ar à escala regional. Para tal desenvolveu-se um inventário de emissões centrado em 2050, que se desagregou para Portugal com uma resolução de 10 km x 10 km. Os resultados obtidos pela cascata de modelos aplicada (MUGCM-MM5-CAMx) permitiram analisar os períodos mais favoráveis à produção fotoquímica em cenário de clima futuro e comparar com a situação actual. Há indicação de um empobrecimento das condições de qualidade do ar, sobretudo no que se refere aos óxidos de azoto nas localidades consideradas hoje em dia como sendo influenciadas pelo tráfego. No geral as concentrações de ozono tenderão a aumentar. As emissões de poluentes gasosos devido à queima de biomassa por incêndios florestais poderá ser agravada em cenário de clima futuro, segundo a análise feita à variação dos máximos do índice de secura do risco meteorológico de incêndio, com o qual a relação com a área ardida apresenta boas relações. Os máximos obtidos para este parâmetro em cenário de clima futuro tenderão a aumentar na parte Sul, interior Centro e Norte de Portugal Continental, em relação à simulação efectuada para clima actual.

Dado que em ciência não há assuntos inesgotáveis, a necessidade de novas vias de exploração impõe-se a cada momento. Neste sentido deixam-se algumas ideias de continuidade na análise desta temática:

- Avaliação das tendências de precursores de ozono por aplicação da metodologia dos filtros passa-baixo Kolmogorov-Zurbenko e identificação das possíveis frequências associadas a fenómenos meteorológicos de carácter peninsular;
- Estudo da eventual correlação entre as oscilações encontradas nas séries de ozono filtradas de longo termo com oscilações nos modos de variabilidade presentes na atmosfera. Averiguação da possibilidade de correlações entre os teores de ^7Be efectuadas em Lisboa e estes modos de variabilidade;
- A modelação numérica da dinâmica associada a estruturas de intrusão de massa de ar estratosférico na baixa troposfera parece fornecer boas indicações das mesmas. Contudo, a simulação das concentrações de ozono ao nível da superfície em eventos desta natureza não foi atingida sendo este um tópico possível a desenvolver no futuro;
- No que se refere à ligação entre as alterações climáticas e a qualidade do ar, como foi dito anteriormente, dever-se-iam explorar vários cenários climáticos e cenários de emissões e atribuir-lhes um significado estatístico. Na hipótese em que sejam definidos os padrões de tempo associados a episódios de ozono, analisar a alteração

na sua ocorrência em cenários climáticos. Estudos recorrendo a modelos de dinâmica de vegetação em cenários de clima futuro poder-se-ão mostrar úteis na avaliação do impacto das variações futuras de temperatura e radiação nas emissões de compostos orgânicos voláteis pela vegetação.

Espera-se que o trabalho aqui desenvolvido possa contribuir para uma reflexão sobre as implicações das nossas actividades, enquanto sociedade e cidadãos, no processo de retro-alimentação existente entre a qualidade do ar do ambiente e as consequências globais de emissões de poluentes gasosos.

Referências

Referências bibliográficas

ADENE / INETI (2001). Fórum Energias Renováveis em Portugal - Relatório Síntese. Versão Online no site do IGM ([http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/energias_renov/ indice.htm](http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/energias_renov/indice.htm)), 2001.

Ahrens, C. Donald (2003). Meteorology today. An introduction to Weather, Climate and the Environment. 7th Edition Thompson Brooks/Cole. ISBN: 0-534-39771-9

Amiro, B.D.; Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Flannigan, M.D. e Wotto, B.M (2001). Fire, climate change, carbon and fuel management in the Canadian boreal forest. *International Journal of Wildland Fire*, 10, pp. 405-413.

André, M.; Hammarström, U.; Reynaud, I. (1999). Driving statistics for the assessment of air pollutant emissions from road transport. INRETS Report, LTE9906, Bron, France.

Aquilina, N.; Dudek, A.V.; Carvalho, A.; Borrego, C. and Nordeng, T.E. (2005). MM5 high resolution simulations over Lisbon. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 08685, 2005. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-08685. European Geosciences Union 2005.

Barros, N.; Rocha, A. and Borrego, C. (1995). The impact of the El-Niño Southern oscillation on the air quality over Portugal: the Lisbon case. *21st Int. Tech. Meeting of NATO-CCMS on "Air Pollution Modelling and its Applications"*, 6-10 Nov., Baltimore, MD, USA, pp. 462-469

Barros, N.; Borrego, C.; Fontes, T.; Carvalho, A. C.; Moreira, N.; Leitão, P. and Henriques, D. (2004). Stratospheric ozone into the troposphere over Portugal. *Air Pollution 2004*, Rhodes, Greece, 30/06 a 02/07.

Barros, Nelson (1999). Poluição atmosférica por foto-oxidantes: o ozono troposférico na região de Lisboa. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para a obtenção do Grau de Doutor em Ciência aplicadas ao Ambiente.

Barry, R.G. and Chorley, R. (1998). Atmosphere, weather and climate. Routledge, Londres, 1998, 7^a edição.

Beer, T.; Gill, A.M. and Moore, P.H.R. (1988). Australian bushfire danger under changing climatic regimes. In G.I. Pearman. Ed. *Greenhouse: Planning for climate change*. CSIRO, Victoria, Australia, pp. 421-427.

Bithell, M.; Vaughan, G. and Gray, L. J. (2000). Persistence of stratospheric ozone layers in the troposphere. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 2563-2570.

Bonasoni, P.; Evangelisti, F.; Bonafe, U.; Ravegnani, F.; Calzolari, F.; Stohl, A.; Tositti, L.; Tubertini, O. and Colombo, T. (2000). Stratospheric ozone intrusion episodes recorded at Mt. Cimone during the VOTALP project: case studies. *Atmospheric Environment*, 34 pp.1355-1365.

Borrego, C.; Miranda, A.I.; Carvalho, A.C. and Fernández, C. (2000a). Climate change impact on the air quality: the portuguese case. *Global Nest the International Journal*. Ed. Th. Lekkas, Vol. 2, nº 2, pp. 199-208.

Borrego, C.; Barros, N.; Valinhas, M.J. e Carvalho, A.C. (2000). Sensitivity Analysis of the Surface Resistance Parameter. A contribution to subproject GLOREAM – Global and Regional Atmospheric Modelling. EUROTRAC-2 (A EUREKA Environmental Project). Annual Report 2000. pp 43-47.

Borrego, C.; Miranda A. I.; Carvalho, A.C.; Monteiro, A.; Martins, H.; Barros, N.; Fontes, T.; Abrantes, T.; Leitão, P., Moreira, N. e Henriques, D. (2003a). Relatório de Progresso, 1º Ano do projecto STRATOZON.

Borrego, C.; Barros, N.; Fontes, T.; Carvalho, A.C.; Miranda, A.I.; Monteiro, A. and Martins, H. (2003b). Avaliação da qualidade do ar relativamente ao ozono troposférico em Portugal, *INGENIUM*, Novembro/Dezembro 2003 - Nº 79, pp. 61-67.

Borrego, C.; Rocha, A.; Miranda, A.I.; Carvalho, A.; Ferreira, J.; Alves, I.; Carvalho, A.C.; Martins, H. (2004). CLIMED Final Report. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, Setembro 2004. AMB-QA-12/04, Relatório Final do Projecto CLIMED (INCO-MED ICA3-1999-30026).

Borrego, C.; Miranda, A.I.; Valente, J. and Martins, H. (2005a). Evaluation and Application of the Smoke Dispersion Systems. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro: 2005, AMB-QA-05/2005. Deliverable D262 of SPREAD Project (EVG1-CT-2001-00043).

Borrego, C.; Miranda, A.I.; Carvalho, A.C.; Monteiro, A.; Martins, H.; Barros, N.; Fontes, T.; Abrantes, T.; Leitão, P.; Henriques, D. e Moreira, N. (2005b). Relatório Final do Projecto STRATOZON.

Brasseur, G.; Prinn, R. and Pszenny, A. Editors (2003). Atmospheric Chemistry in a Changing World. An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research. The IGBP Series. Springer. ISBN: 3-540-43050-4.

Brasseur, G. P.; J. J. Orlando, and G. S. Tyndall (1999). Atmospheric Chemistry and Global Change. Oxford University Press, 654 pgs.

Carvalho, A. C., Miranda, A. I. Ferreira, C., Borrego, C. and Rocha, A. (1997). Effects of climate change in regional weather patterns over Portugal. *proc 1st GLOREAM Workshop*. Eds. H. Hass, I. J. Ackermann. Aachen, Germany, September 1997, pp. 13-19.

Carvalho, A.; Ferreira, J.; Arreola, J.L.; Carvalho, A.C.; Miranda, A.I.; Alonso, S. and Borrego, C. (2002). Sensitivity tests of MM5 modelling system over a coastal region in Portugal. *Air Pollution 2002*, Segovia, Spain, 1 – 2 July, 2002. *Air Pollution X*, Eds C. A. Brebbia & J.F. Martin-Duq, WITpress Nottingham, pp. 503-512

Carvalho, A.C., Carvalho, A., Miranda, A. I., Borrego, C. and Rocha A. (2001). Climate change and fire weather risk. Detecting and Modelling Regional Climate Change and Associated Impacts. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: M. Brunet and D. López.

Carvalho, Anabela Vitorino (2002). Alterações Climáticas e Risco Meteorológico de Incêndio Florestal. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção de Grau de Mestre em Gestão e Políticas de Ambiente. Aveiro.

Chen, Ho; Lai, Tsai and Chen (2004). Trends in Concentration of Ground-Level Ozone and Meteorological Conditions during High Ozone Episodes in the Kao-Ping Airshed, Taiwan. *Journal of Air & Waste Management Association*. Vol **54**: pp. 36-48.

COM (2001) 547 Final. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social e ao Comité das Regiões relativa a combustíveis alternativos para transportes rodoviários e a um conjunto de medidas destinadas a promover a utilização de biocombustíveis, Bruxelas, 2001.

Coutinho, Miguel Sala (1995). As circulações atmosféricas de mesoscala na costa portuguesa. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente.

Cruz, M.G. (2000). Descrição do Sistema Canadano de Indexação do Perigo de Incêndio; ADAI, Coimbra, Portugal.

Davies, T. D. e Schuepbach, E., (1994). Episodes of high ozone concentrations at the earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies. *Atmospheric Environment*, Vol. 28, No.1, pp.53-68.

Decreto do Governo N° 5/88, de 9 de Abril de 1988. Protocolo sobre poluição atmosférica transfronteiras.

Decreto-Lei 193/2003, de 22 de Agosto. Transpõe a Directiva n.º 2001/81/CE. Fixa os tectos de emissão nacionais de determinados poluentes atmosféricos, tomando como referência os anos de 2010 e 2020, transpondo para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2001/81/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro.

Decreto-Lei N.º 255/80, de 30 de Julho de 1980. Concentração à superfície e emissões poluentes atmosféricos.

Decreto-Lei N° 111/2002, de 16 de Abril de 2002. Valores limite e gestão da qualidade do ar referentes a determinados poluentes.

Decreto-Lei n.º 202/2000, de 1 Setembro. Regulamenta as homologações de veículos, sistemas e unidades técnicas relativamente às emissões poluentes e, simultaneamente. Transpõe as Directivas n.º 98/69/CE e n.º 98/77/CE.

Decreto-Lei N.º 320/2003 de 20 de Dezembro de 2003. Transpõe a Directiva n.º 2002/3/CE. Estabelece objectivos a longo prazo, valores alvo, um limiar de alerta e um limiar de informação ao público para as concentrações do ozono no ar ambiente, bem como as regras de gestão da qualidade do ar aplicáveis a esse poluente.

Despacho Normativo n.º 29/87, de 20 de Março de 1987. Fixa os valores limites e os valores guias no ambiente para o dióxido de enxofre, partículas em suspensão, dióxido de azoto e ainda o valor limite para o chumbo.

DGE (1999). A procura de energia em Portugal 2000-2020, Sector Industrial. Direcção Geral de Energia, DGE/DSPA/DP, Julho 1999.

DGF (2003). Incêndios Florestais 2003. Relatório provisório de 3 de Novembro de 2003. Direcção Geral de Florestas (DGF). Divisão de Protecção e Conservação Florestal.

Directiva 2002/03/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho de 12 de Fevereiro de 2002, relativa ao ozono no ar ambiente.

Directiva Comunitária 2002/3/CE, de 12 de Fevereiro de 2002. Ozono no ar ambiente.

Directiva Comunitária N.º 1998/69/CE, de 13 de Outubro de 1998. Relativa às medidas a tomar contra a poluição do ar pelas emissões provenientes dos veículos a motor.

Directiva Comunitária n.º 2001/81/CE, de 23 de Outubro de 2001. Valores-limite emissão poluentes atmosféricos

Directiva n.º 2001/81/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro. Relativa ao estabelecimento de valores-limite nacionais de emissão de determinados poluentes atmosféricos

Dudhia, J. (1993). A nonhydrostatic version of the Penn State - NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1493-1513.

EC (2003). European Commission: Forest Fires in Europe – 2003 Fire Campaign, Schmuck, Miguel-Ayanz, Barbosa, Camia, Kucera & Liberta (Ed), Official Publication of the European Communities, SPI.04.124 EN, 2204.

EDP (2001). Relatório Técnico; Versão *Online* no site da EDP (<http://www.edp.pt>).

EEA (1998). Tropospheric Ozone in EU - The consolidated report. Topic report No 8/1998. (<http://reports.eea.eu.int/TOP08-98/en/page001.html>).

EEA (2002). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 3rd edition UPDATE; Technical Report No 30; October 2002.

EEA (2004). Air pollution in Europe 1990-2000. Topic Report 4/2003. EEA, 2004.

Elbern, H.; Hendricks, J. and Ebel. A. (1998). A climatology of tropopause folds by global analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 59, pp 181-200.

- Elbern, H.; Kowol, J.; Sládkovic, R. and Ebel, A. (1997). Deep stratospheric intrusions: a statistical assessment with model guided analysis. *Atmospheric Environment*, Vol.31, Nº 10, pp. 3207-3226.
- ENVIRON (2004). Comprehensive Air Quality Model with Extensions – CAMx. Version 4.0, User's guide. ENVIRON International Corporation.
- EPA (2004). The ozone report. Measuring Progress through 2003. EPA Publications Nº 454/K-04-001.
- Eskridge, E. R.; Ku, J. Y.; Rao, S. T.; Porter, P.S and Zurbenko, I. G. (1997). Separating different Scales of Motion in Time Series of Meteorological Variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 78, Nº 7, July 1997.
- Ferreira, Denise de Brum (1984). Le Systeme Climatique de l'Upwelling Oust Iberique. Linha de Acção de GEografia Física. Reatório nº 19. Centro de Estudos Geográficos. INIC. Lisboa, 1984.
- Ferreira, J. e Miranda, P. (2005). Numerical simulation of *upwelling* with a coupled atmosphere-ocean model. European Geosciences Union General Assembly 2005, X086; EGU05-A-03650:AS2.02-1FR3P-0086
- Ferreira, J.; Carvalho, A.; Carvalho, A. C.; Monteiro, A.; Martins, H.; Miranda, A. I and Borrego, C. (2003). Chemical Mechanisms in two photochemical modelling systems: a comparison procedure. In *Int. Tech. Meeting of NATO-CCMS on "Air Pollution Modelling and its Application"*, 26th, Istanbul, Turkey, 26-30 May 2003 - *Air Pollution Modelling and its Application XVI*, Eds Carlos Borrego and Selahattin Incecik, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp. 87-96.
- Ferreira, J.; Salmim, L.; Monteiro, A.; Miranda, A. I. e Borrego, C. (2004). Avaliação de episódios de ozono em Portugal através da modelação fotoquímica. In 8^a Conferência Nacional de Ambiente, 27-29 de Outubro 2004, Lisboa, Portugal. *Actas da 8^a Conferência Nacional de Ambiente: Lisboa*, pp. 383-384. Artigo publicado em CD-Rom.
- Flannigan, M.; Wottom, M.; Carcaillet, C.; Richard, P.; Campbell, I. and Bergeron, Y. (1998). Fire weather: Past, Present and Future. Proc. From the 3rd *International Conference on Forest Fires Research*. 14th *Conference on Fire and Forest Meteorology*. Luso, 16-20 November 1998 – Portugal. Volume I. p. 113-128.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.J. and Wotton, B.M. (2000). Climate change and forest fires. *The Science of the Total Environment*, 260, pp.221-229.
- Fuhrer, J.; Skärby, L., and Ashmore, M.R. (1997). Critical Levels for Ozone Effects on Vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, Vol. 97, pages 91-106.
- Gaarder, Jostein (1996). O mundo de Sofia: uma aventura na filosofia. Lisboa. Ed: Presença, 1996.
- Gauss, M.; Dentener, F.; Ellingsen, K.; Isaksen, I. (2005). Two model assessment studies focussing on ozone, climate, and air quality. In Proc. of the 5th *International Conference on*

Urban Air Quality. Valencia, Espanha, 29-31 March, 2005. Ed: Ranjeet S. Sokhi, Millán M. Millán and Nicolas Moussiopoulos.

Gery, M.W.; G.Z. Whitten; J.P. Killus and M.C. Dodge (1989). A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modeling. *Journal of Geophysical Research*, 94, 925-956.

Graedel, T. E. e Crutzen, P. J. (1993). Atmospheric Change. An Earth System Perspective. Published: April 1993 by W H Freeman.

Griffies, S. M.; Böning, C.; Bryan, F. O.; Chassignet, E. P.; Gerdes, R.; Hasumi, H.; Hirst, A.; Treguier, A. M. and Webb, D. (2000). Developments in ocean climate modeling. *Ocean Modelling*, 2, pp 123-192.

Heimann, D. e Busch, U. (2000). Statistical-dynamical downscaling. (<http://wetterstation.pa.op.dlr.de/climate/sdr.html>).

Henriques, D. (2004). “Caracterização meteorológica de episódios de concentração elevada de ozono à superfície, 1ª parte - Inventário de potenciais episódios de intrusão estratosférica em Portugal com base em observações da quantidade total de ozono e de sondagens aerológicas”. Relatório Final – Resumo, Instituto de Meteorologia, 2004.

Hickman J.; D. Hassel, R.; Jourmard, Z.; Samaras, S. and Sorenson (1999). Methodoly for calculating transport emissions and energy consumption. European Commission, DG VII, ISBN 92-828-6785-4, Luxemburg, 362 p, 1999.

Hogrefe, C.; Biswas, J.; Lynn, B.; Civerolo, K.; Ku, J.-Y.; Rosenthal, J.; Rosenzweig, C.; Goldberg, R. and Kinney, P.L. (2004). Simulating regional-scale ozone climatology over the eastern United States: model evaluation results. *Atmospheric Environment*, 38, pp. 2627–2638.

Hogrefe, C.; Vempaty, S.; Rao, S. T.; Porter, P. S. (2003). A comparision of our tech iques for separating different time scales in atmospheric variables. *Atmopsheric Environment*, 37, pp. 313-325.

Hoinka, K and Castro, M. (2003). The Iberian Peninsula thermal low. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129, pp.1491-1511.

Holton, J. R.; Haynes, P. H.; McIntyre, M. E.; Douglass, A. R.; Rood, R. B.; Pfister, L. (1995). Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, 33, 403-439.

Hoskins, B.J.; M.E. McIntyre and A.W. Robertson (1985). On the use and significance of isentropic potencial vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, pp. 877-946.

Hov (1998). Troposferic Ozone Research: Troposferic Ozone in the Regional and Sub-regional Context. Series: Transport and Chemical Transformation of Pollutants in the Troposphere, Vol. 6. Ed: Hov, Östein.

Howe, W. e Henderson-Sellers, A. (1997). Assessing climate change – Results from the models evaluation consortium for climate assessment. Ed. Gordon and Breach, Amsterdam.

IA (2002a). Relatório do Estado do Ambiente 2001. Ed. Instituto do Ambiente. ISBN: 972-8419-66-X.

IA (2002b). Avaliação preliminar da qualidade do ar em Portugal, no âmbito da Directiva 1999/30/CE - SO₂, NO₂, NO_x, PM₁₀ e Pb. Ed. Instituto do Ambiente. ISBN 972-8419-77-5.

INE (2004). Projecções de população residente Portugal e NUTS II 2000-2050. Ed. Instituto Nacional de Estatística, 2004.

IPCC (1994). Climate change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Ed: Houghton, J.T.; Meira Filho, L.G.; Bruce, J.; Hoesung Lee; Callander, B.A.; Haites, E.; Harris, N. and Maskell, K. Cambridge University Press, UK. pp 339.

IPCC (2000). Special Report on Emission Scenarios. Ed. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (<http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>).

IPCC (2001). Climate Change 2001: The Scientific Bases. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed.: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai and C.A. Johnson. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

IPCC (2001b). Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ed: B. Metz, O. Davidson, R. Swart and J. Pan. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 762 pp.

Johnson, W. B. & Viezee, W. (1981). Estratospheric ozone in the lower troposphere – I. Presentation and interpretation of aircraft measurements. *Atmospheric Environment*, Vol 15, N° 7, 1309-1323.

Kowol-Santen, J.; Elbern, H. and Ebel, A. (2000). Estimation of cross-tropopause air mass fluxes at mid-latitudes: comparison of different numerical methods and meteorological situations. *Monthly Weather Review*, 128, p. 4045-4057, 2000.

Ladstätter-Weissenmayer, A.; Meyer-Arnek, J.; Richter, A.; Wittrock, F. and Burrows, J. P. (2005). Tropospheric O₃ over Indonesia during biomass burning events measured with GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) and compared with trajectory analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5, pp. 3105–3130, 2005 (<http://www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/5/3105/acpd-5-3105.pdf>).

Langner, J.; Bergström, R. and Foltescu, V. (2005). Impact of climate change on surface ozone and deposition of sulphur and nitrogen in Europe. *Atmospheric Environment*, 39, pp. 1129-1141.

Lee, E. H.; Tingey, D. T.; Hogsett, W. E. and Laurence, J. A. (2003). History of tropospheric ozone for the San Bernardino Mountains of Southern California, 1963–1999. *Atmospheric Environment*, 37, pp. 2705-2717.

Leggett, J., W.J. Pepper, and R.J. Swart (1992). Emissions scenarios for IPCC: An update. In *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. J.T. Houghton, B.A. Callander, S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

Leitão, P. e Moreira, N. (2004). O ozono estratosférico na baixa troposfera sobre Portugal – STRATOZON – Caracterização meteorológica de episódios de concentração elevada de ozono à superfície (2ª parte). Relatório Preliminar. Instituto de Meteorologia. Janeiro de 2004. Lisboa.

Leitão, J.; Soares, J.; Carvalho, A. C. e Borrego, C. (2004). Correlação entre a estabilidade e as concentrações de poluentes na atmosfera. In *Actas da 8ª Conferência Nacional de Ambiente* (artigo completo em CD-ROM). Organização: Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. 27-29 de Outubro de 2004. Lisboa. Portugal.

Leitão, P.; Figueiredo, J.; Carvalho, A. C.; Santos, P. (2003). Modelação e Observação da Dispersão da Pluma e dos impactos sobre o meio receptor. Programa de Monitorização do Emissário Submarino de São Jacinto. Instituto Superior Técnico – Universidade de Aveiro. Dezembro 2003.

Martin, P. (1998). Regional aspects of climate change. *Proceedings of the European School and Natural Hazards Course*, Volterra, Italy, 1998.

Martins, H.; Carvalho, A.; Miranda A.I.; Salmim, L. e Sousa, M. (2004). Incêndios florestais periurbanos e qualidade do ar. In 8ª Conferência Nacional de Ambiente, 27-29 Outubro 2004, Lisboa, Portugal. *Actas da 8ª Conferência Nacional de Ambiente*, pp. 408-409. Artigo publicado em CD-Rom.

Mata Reis, R.M. (1998). Determinação do Risco de Incêndio à Escala Nacional – Integração de informação proveniente de um índice meteorológico e do risco regional. Instituto de Meteorologia, Dep.^{to} de Vigilância Meteorológica, Centro de Análise e Previsão do Tempo, Lisboa, Portugal.

Maxwell-Meier, Kari and Chang, M. E. (2004). Fall line Air Quality Study. FAQS. Final Report. Section II: Field Studies. Part 2: Supplemental Report, Comparison of Ozone Temporal Scales for Large Urban, Small Urban and Rural Areas in Georgia (http://cure1.eas.gatech.edu/~faqs/finalreport/FAQS_final_report_section_II_part_2_v1.doc)

McIlveen, Robin (1998). *Fundamentals of Weather and Climate*. Stanley Thornes (Publishers) Ltd. ISBN: 0-7487-4079-1.

Mearns, L.O.; Giorgi, F.; Whetton, P.; Pabon, D.; Hulme, M. e Lal, M. (2003); *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments; DDC of IPCC TG CIA, Final Version*.

MIE (1995). *Energia 1995-2015. Estratégia para o Sector Energético*; Ministério da Indústria e Energia, Secretaria de Estado da Energia, 1995.

- Miranda, A. I.; Borrego, C.; Rocha, A.; Viegas, X.; Carvalho, A.; Carvalho, A. C.; Marques, C.; Martins, H. (2004). Projecto QUIMERA-Alterações climáticas em Portugal: impacte na ocorrência de fogos florestais e na qualidade do ar (Ref^o: POCTI/34346/CTA/2000). Relatório Final.
- Miranda, A. I. (2004). An integrated numerical system to estimate air quality effects of forest fires. *International Journal of Wildland Fire*, 13, pp. 217-226.
- Miranda, A.I.; Martins, H.; Carvalho, A. and C. Borrego (2005). Modelling smoke effects on Lisbon air quality. In *Proc. of The Joint Meeting of the Sixth Fire and Forest Meteorology Symposium and the 19th Interior West Fire Council Meeting*. 25-27 October 2005, Canmore, AB, Canada.
- Mitchell, J. e Johns, T. (1997). On modification of global warming by sulfate aerosols. *Journal of Climate*, 10, pp.245-267, 1997.
- Monks, Paul S. (2000). A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 3545-3561.
- Monteiro, A.; Borrego, C.; Tchepel, O.; Santos, P. e Miranda, A. I. (2001). Inventário de Emissões Atmosféricas – base de dados POLAR2. Aplicação à modelação atmosférica. 7^a Conferência Nacional sobre a Qualidade do Ambiente, Aveiro, Portugal, pp. 954-958.
- Monteiro, A.; Vautard, R.; Lopes, M.; Miranda, A.I. and Borrego, C. (2004). Air Pollution Forecast in Portugal: a demand from the new Air Quality Framework Directive. In 9th *Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1 - 4 June 2004. Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes Proceedings. Ekaterina Batchvarova and Dimiter Syrakov 218-222.
- Monteiro, A.; Vautard, R. ; Borrego, C. e Miranda, A. I. (2005). Long-term simulations of photo oxidant pollution over Portugal using the CHIMERE model. *Atmospheric Environment*, Volume 39, Issue 17, June 2005, Pages 3089-3101.
- Monteiro, A.; Vautard, R.; Lopes, M.; Miranda, A. I. and Borrego, C (2005b). Air Pollution Forecast in Portugal: a demand from the new Air Quality Framework Directive. *International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 25, Nos 1/2/3/4.
- Monteiro, Maria Alexandra C. Sobral (2003). Poluição atmosférica na região de Aveiro: modelação de mesoscala e sua validação. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Poluição Atmosférica.
- Moreira, N. (2004). Caracterização meteorológica de episódios de concentração elevada de ozono à superfície – Aplicações em UNIX e LINUX. Instituto de Meteorologia. Janeiro 2004, Lisboa.
- Moreira, N.; Leitão, P.; Carvalho, A. C.; Henriques, D.; Barros, N.; Fontes, T. and Borrego, C. (2005). Meteorological analysis of ozone episodes in the “STRATOZON” Project. *Actas da 4^o Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG* (e 6^o Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia), 14-17 de Fevereiro de 2005, Sesimbra, Portugal.

Morgan, M. e Nielson-Gammon, J. (1998). Using tropopause maps to diagnose midlatitude weather systems. *Monthly Weather Review*, 126, pp. 2555-2579.

Morgenstern, Olaf and Carver, Glenn D. (2001). Comparison of cross-tropopause transport and ozone in the upper troposphere and lower stratosphere region. *Journal of Geophysical Research*, Vol 106, N° D10 pp. 10205-10221.

OECD/IEA (2003). Energy to 2050. Scenarios for a Sustainable Future. International Energy Agency. ISBN 92-64-01904-9, 2003.

Pausas, J.G. (2004). Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic Change*, 63, 337-350.

Peixoto, José P. and Oort, Abraham H. (1992). Physics of Climate. Ed: American Institute of Physics.

Peixoto, José Pinto (1981). A Radiação Solar e o Ambiente. Colecção O Ambiente e o Homem. Secretaria de Estado do Ordenamento e Ambiente. Comissão Nacional do Ambiente. Lisboa. 1981.

Porter, P. S.; Rao, S. T.; Zurbenko, I. G; Dunker, A. M. and Wolff, G. T. (2001). Ozone Air Quality over North America: Part II – An analysis of trend detection and attribution techniques. *Journal of Air and Waste Management Association*, 51, 283-306.

Salby, Murry L. (1996). Fundamentals of atmospheric physics. International Geophysics Series. Volume 61. Eds: Renata Dmowska and James R. Holton. Academic Press.

Salmim, Liliana Isabel Faria (2005). Avaliação da Qualidade do Ar: aplicação a cenários de emissões. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Poluição Atmosférica. Aveiro, Portugal, 2005.

San José, R.; Stohl, A.; Karatzas, K.; Bohler, T.; James, P. and Pérez, J. L. (2005). A modelling study of an extraordinary night time ozone episode over Madrid domain. *Environmental Modelling and Software*, 20, pp. 587-593.

Santos, F.D.; Forbes, K. and Moita, R (Ed., 2002). Climate change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures _SIAM. Executive Summary and Conclusions, Gradiva, Lisbon.

Santos, Pedro Jorge Paiva (2005). Análise de séries temporais em zonas costeiras e dispersão de poluentes. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Poluição Atmosférica.

Schuepbach, E.; Davies, T. D. and Massacand, A. C. (1999). An unusual springtime ozone episode at high elevation in the Swiss Alps: contributions both from cross-tropopause exchange and from the boundary layer. *Atmospheric Environment*, 33, pp.1735-1744

Seinfeld, John H. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. John Wiley & Sons, Inc. Nova Iorque, 1998.

Simmonds, I. (1985). Analysis of the “spin up” of a General Circulation Model. *Journal of Geophysical Research*, 90, pp.5637-5660, 1985.

- Simmonds, I.; Trigg, G. e Law, R. (1988). The Climatology of the Melbourne University General Circulation Model. Publi, N° 31, Dept. of Meteorology, University of Melbourne, INTIS PB 88 227491, 67 pp, 1988.
- Stohl A.; Spichtinger-Rakowsky, N.; Bonasoni, P.; Feldmann H.; Memmesheimer, M.; Scheel, H.E.; Trickl, T.; Hübener, S.; Ringer W. and Mandl, M. (2000). The influence of stratospheric intrusions on alpine ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 1323-1354
- Stoks, B.J.; Fosberg, M.A. and Lynham, T.J. (1998): Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests. *Climatic Change*, 38, pp: 1-13.
- Street, R.B. (1989). Climate change and forest fires in Ontario. In *Proceedings of the 10th Conference on Fire and Forest Meteorology*, 17-21 April, Ottawa. Forestry Canada, Ottawa, pp. 177-182.
- Stull, Roland B. (1994). Meteorology today for scientists and engineers. A technical companion book. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994, 5th edition.
- Stull, Roland B. (2000). Meteorology today for scientists and engineers. Second edition. Brooks/Cole Thompson Learning. Estados Unidos da America.
- Tchepel, O. (1997). Application of Geographical Information System to Mesoscale Atmospheric Pollution Modelling; Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Poluição Atmosférica, Aveiro, 1997.
- Tchepel, O. (2003). Modelo de emissões para apoio à decisão na Gestão da Qualidade do Ar; Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Doutor em Ciências Aplicadas ao Ambiente, Aveiro, 2003.
- Tsonis, Anastasios A. (2002). An Introduction to Atmospheric Thermodynamics. Cambridge University Press. pp.171.
- Tulet, P.; Suhrec, K.; Maria, C.; Solmona, F.; and Rosseta R. (2002). Mixing of boundary layer and upper tropospheric ozone during a deep convective event over Western Europe. *Atmospheric Environment*, 36, pp. 4491–4501.
- UE (2003). Ozone-climate interactions. Air pollution research report N° 81. Directorate-General for Environment and sustainable development programme. ISBN: 92-894-5619-1.
- Van Wagner, C.E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System; Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa, Canada.
- Vaughan G.; Gouget, H.; O'Connor, F.M. and Wier, D. (2001). Fine-scale layering on the edge of a stratospheric intrusion. Short Communication. *Atmospheric Environment*, 35, pp. 2215-2221.
- Viegas, D. X. e Viegas, M. T. (1994). A relationship between rainfall and burned area for Portugal. *International Journal of Wildland Fire* 4 (1), pp. 11-16.

Viegas, D.X.; Cruz, M.G.; Ribeiro, L.M.; Silva, A.J.; Ollero, A.; Arrue, B.; Dios, R.; Gómez-Rodríguez, F.; Merino, L.; Miranda, A.I.; Santos, P. (2002). Gestosa fire spread experiments. *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. 2002 Millpress, Rotterdam (<http://www.millpress.nl/shop/abooks/ICFFR4/index.htm>).

Viegas, D.X.; Reis, R.M.; Cruz, M.G. e M.T. Viegas (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal; Silva Lusitana 12(1), pp77-93, EFN (Ed.), Lisboa, Portugal.

Viegas, X.D.; Bovio, G.; Ferreira, A.D.; Nosenzo, A. and Sol, B. (2000). Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire* 9(4) pp. 235-246.

Vingarzan, Roxanne and Taylor, Bill (2003). Trend analysis of ground level ozone in the greater Vancouver/Fraser Valley area of British Columbia. *Atmospheric Environment*, 37, pp. 2159-2171.

Volz, A. and Kley, D. (1988). Evaluation of the Montsouris Series of Ozone Measurements made in the Nineteenth Century. *Nature*, 332, 240-242.

Volz-Thomas, A.; Beekman, M.; Derwent, D.; Law, K.; Lindskog, A.; Prévôt, A.; Roemer, M.; Schultz, M.; Schurath, U.; Solberg, S. e Stohl, A. (2002). Tropospheric ozone and its control. *Results from EUROTRAC-2 Synthesis and Integration Project*, ed. P. Midgley, P. Builtjes, R. Harrison e K. Tørseth, Margraf Publishers, Germany, pp. 73-122.

Wilks, Daniel S. (1995). Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction. San Diego (CA). Academic Press. International Geophysics Series, 59.

WMO (1994). Global Atmosfere Watch – GAW - Quality Assurance/Science Activity Centre, Quality assurance project plan (QAPjP) for continuous ground based ozone measurements.

WMO (1998). Scientific Assessment of ozone depletion: 1998. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44. Executive Summary. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United Nations Environment Programme, World Meteorological Organization and European Commission.

WMO (2003). Climate into the 21st Century. Ed. by William Burroughs. Cambridge University Press

Wolff, G. T.; Dunker, A. M.; Rao, S. T.; Porter, P. S. and Zurbenko, I. G. (2001). Ozone Air Quality over North America: Part II –A review of reported trends. *Journal of Air and Waste Management Association*, 51, 273-282.

Zanis, P.; Trickl, A. Stohl, H. Wernli, O. Cooper, C. Zerefos, H. Gaeggeler, C. Schnabel, L. Tobler, P. W. Kubik, A. Priller, H. E. Scheel, H. J. Kanter, P. Cristofanelli, C. Forster, P. James, E. Gerasopoulos, A. Delcloo, A. Papayannis, and H. Claude (2003). Forecast, observation and modelling of a deep stratospheric intrusion event over Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* European Geosciences Union, 2003. <http://www.atmos-chem-phys.org/acpd/3/1109/>

Zlatev, Zahari (2002). Comprehensive Air pollution studies by the Danish Eulerian Model. In Global and regional atmospheric modelling. *Proc. of the 6th GLOREAM workshop*. Aveiro, Portugal, 4-6 September 2002. Ed: Carlos Borrego, Peter Builtjes, Ana Isabel Miranda, Pedro Santos and Ana Cristina Carvalho.

Consulta de sítios da internet

URL 1: http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/background/items/1351.php. *Página da Internet do Portal da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (United Nations Framework Convention on Climate Change)*.

URL 2: <http://box.mmm.ucar.edu/mm5/>. *Página da Internet da Comunidade MM5, mantida pela Cooperação das Universidades para a Investigação Atmosférica (University Corporation for Atmospheric Research), Boulder, EUA*.

URL 3: <http://www.weather.ul.pt/>. *Página da Internet associada ao Projecto CLIMMAT - Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos*.

URL 4: <http://www.fis.ua.pt/torre/Yamazaki/modelos/>. *Página da Internet do Departamento de Física da Universidade de Aveiro*.

URL 5: <http://meteo.ist.utl.pt/>. *Página da Internet da Secção de Ambiente e Energia do Instituto Superior Técnico*.

URL 6: <http://www.ineti.pt/conteudo/pgdetalheconteudo.php?idc=100&idn=&id=4963>

URL 7: <http://webdab.emep.int>. *Página da Internet do Portal UNECE/EMEP (United Nations Economic Commission for Europe/Co-operative programme for monitoring and evaluation of long range transmission of air pollutants in Europe) referente à base de dados de emissões*.

URL 8: <http://ghg.unfccc.int/>. *Página da internet da base de dados de emissões de gases de efeito de estufa do Portal da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas*

URL 9: <http://www.aqmd.gov/news1/images/1smog.gif>. *Página da internet do "South Coast Air Quality Management District", Estados Unidos da América*.

URL 10: <http://www.radford.edu/~wkovarik/envhist/7forties.html>. *Página da Internet da Cronologia da história do Ambiente no Portal da Universidade de Radford, EUA*.

URL 11: http://www.yale.edu/environment/faculty/bell/research/files/london_1952.jpg. *Página da Internet de Michelle L. Belle, Professora de Saúde Ambiental na Universidade de Yale, Estados Unidos da América*.

URL 12: <http://www.env.leeds.ac.uk/envi1280/jackson1.html>. *Página da Internet da "School of Earth and Environment", University of Leeds*.

URL 13: <http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/SatManu/Basic/Convection/Parameters.htm>. *Página da Internet do Portal "Manual of synoptic satellite meteorology. Conceptual models and case studies. Financiado pelo EUMETSAT*.

URL 14: <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.htm>. *Sítio da Internet do Portal do NOAA's National Weather Service Weather Forecast Office. Louisville, KY, EUA*.

URL 15: <http://www.meteo.pt/InformacaoClimatica/Anos/Ano2001/Ano2001.htm>. *Página da internet do Portal do Instituto de Meteorologia de Portugal*.

URL 16: <http://www.eumetsat.int/>. Portal da Organização europeia para a exploração de satélites meteorológicos - European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites.

URL 17: <http://www.ssec.wisc.edu/~billh/vis5d.html>. *Página da internet do software de visualização VIS5D, associada à Universidade de Wisconsin-Madison, EUA.*

URL 18: <http://grads.iges.org/grads/head.html>. *Página da internet do software de visualização GrADS (Grid Analysis and Display System).*

URL 19: <http://www.ozonelayer.noaa.gov/action/tovs.htm>. *Portal da National Oceanic & Atmospheric administration para a monitorização e investigação sobre o ozono estratosférico.*

URL 20: <http://www.arl.noaa.gov/ss/models/hysplit.html>. *Página da internet do modelo HYSPLIT desenvolvido pela NOAA, EUA.*

URL 21:

http://medioambiente.madrid.org/areastematicas/atmosfera/calidad_aire/desc_red/Mapa-Zonas.jpg. *Página da internet do portal da “Consejería de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid”.*

URL 22: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. *Página da Internet do Departamento das Ciências Atmosféricas, Colégio de Engenharia da Universidade do Wyoming, EUA.*

URL 23: <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cgi-bin/ddcvis/gcmcf>. *Página da internet o Portal do Centro de Distribuição de Dados do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas, com resultados de modelos globais.*

URL 24: http://www.aero.jussieu.fr/~sparc/SPARCReport1/3.05_Trends/3.05_Trends.html. *Página da internet do projecto “Stratospheric Processes And their Role in Climate” pertencente ao “World Climate Research Programme”.*

URL 25: <http://www.dge.pt>. *Portal da Direcção Geral de Geologia e Energia.*

Anexos

Anexo I
Índices de estabilidade atmosférica

Lifted-Index (LI)

Este índice constitui um parâmetro simples usado na caracterização da quantidade de instabilidade num dado ambiente. O parâmetro LI incorpora a humidade e o gradiente vertical de temperatura (estabilidade estática) apenas num valor, o que o torna menos vulnerável a observações em níveis de pressão individuais. Contudo, o valor final de LI irá depender do nível a partir do qual a parcela inicia a sua ascensão.

O seu valor é dado pela diferença de temperaturas entre uma parcela de ar, em expansão entre os primeiros 50 e 100 hPa (ainda no seio da CL) até aos 500 hPa, e a temperatura do ambiente a esse mesmo nível por:

$$LI = T_{p_{500}} - T_{amb_{500}}$$

onde:

$T_{p_{500}}$ é a temperatura da parcela em expansão até aos 500 hPa (°C);

$T_{amb_{500}}$ é a temperatura do ambiente aos 500 hPa (°C).

A temperatura da parcela aos 500 hPa determina-se fazendo ascender uma parcela de ar, representativa do ar junto à superfície, pela curva adiabática seca até ao nível de condensação livre, e deste ponto até aos 500 hPa pela adiabática humida (Figura AI 1). Se a diferença de temperatura for positiva, a temperatura da parcela é inferior à temperatura ambiente, no nível de pressão de 500 hPa, as condições de flutuação são negativas e a parcela tende a descer.

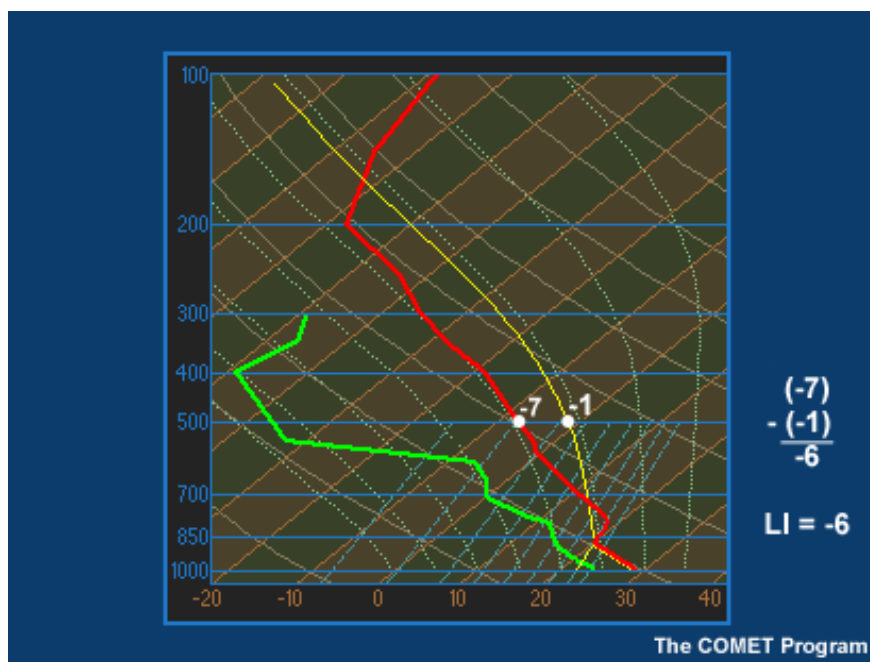


Figura AI 1: Exemplo do cálculo de LI, através de um diagrama Skew-T.

Os valores que este índice pode assumir, bem como o seu significado físico em termos de potencial convectivo, encontram-se na Tabela AI 1.

A desvantagem associada ao LI reside no facto de este apenas estimar a convecção potencial existente apenas com base num nível. Assim, pode acontecer não fornecer indicações sobre a real convecção existentes na atmosfera.

Tabela AI 1: Valores de LI e seu significado físico em termos de estabilidade (URL 1; URL 2).

LI	Potencial convectivo
> 0	Estável, contudo para valores na gama de 1 a 3 pode surgir convecção, se uma forte força de flutuação estiver presente
- 3 a 0	Minimamente instável: convecção fraca
- 6 a - 3	Moderadamente instável: convecção moderada
- 9 a - 6	Muito instável: convecção forte
< - 9	Extremamente instável: convecção muito forte

Convective Available Potential Energy (CAPE)

O CAPE fornece uma estimativa mais completa da energia de flutuação da parcela de ar em ascensão tendo por base a teoria da parcela de ar. Este parâmetro representa a quantidade de energia, associada à flutuação, disponível para acelerar a partícula na direcção vertical. Avalia, então, a energia cinética de uma parcela em expansão entre o seu nível de convecção livre e o nível de equilíbrio (URL 2). Entende-se por nível de convecção livre (LFC) o nível de pressão a partir do qual uma partícula passa a ter a sua própria força de flutuação, e nível de equilíbrio (EL) o nível de pressão ao qual uma partícula em ascensão se torna mais fria que o ar ambiente (URL 3)

O CAPE é calculado pela integração, em altura, da diferença entre a temperatura da parcela em expansão e a temperatura do ar ambiente. Num diagrama termodinâmico do tipo *Skew-T*, o CAPE (a cor-de-laranja) pode ser obtido pela área positiva compreendida entre a adiabática saturada (linha amarela) e a curva de temperatura (linha vermelha) determinada pela radiossondagem, entre os níveis de LFC e o EL, como se pode observar na Figura AI 2.

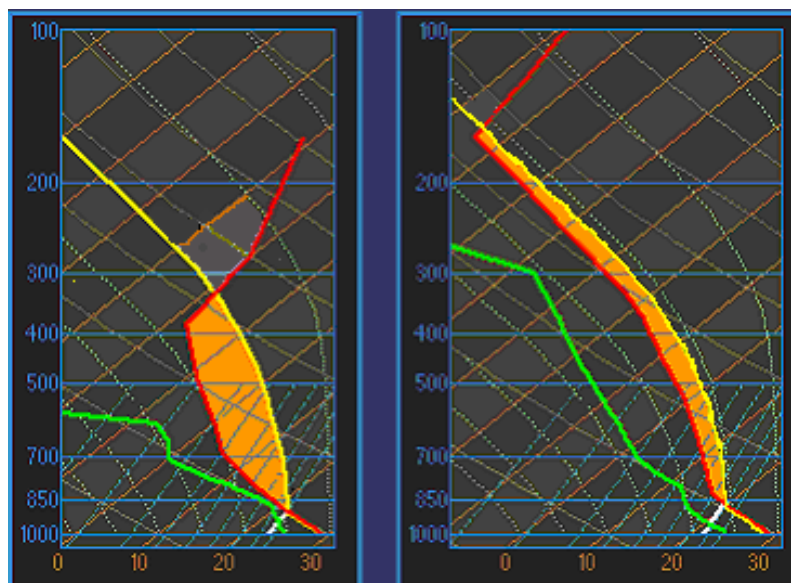


Figura AI 2: Cálculo de CAPE num diagrama termodinâmico *Skew-T* a partir de uma radiossondagem (URL 3).

Este parâmetro de instabilidade é numericamente é calculado por:

$$CAPE = g \int_{LFC}^{EL} \left[\frac{(T_p - T_{amb})}{T_{amb}} \right] dz \quad (\text{J.kg}^{-1})$$

sendo:

g a gravidade (m.s^{-2});

T_p a temperatura da parcela ($^{\circ}\text{C}$);

T_{amb} a temperatura do ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

dz a diferença de altura entre os níveis LFC e EL (m).

Os valores que o CAPE pode assumir, bem como o seu significado físico em termos de potencial convectivo, encontram-se na Tabela AI 2. Este parâmetro pode ser calculado usando os valores da temperatura potencial virtual.

Tabela AI 2: Valores de CAPE e seu significado físico em termos de potencial convectivo (URL 2).

CAPE	Potencial convectivo
0	Estável
< 300	Minimamente instável: convecção muito fraca
300 - 1000	Minimamente instável: convecção fraca
1000 - 2500	Moderadamente instável: convecção moderada
2500 - 3500	Muito instável: convecção forte
> 3500	Extremamente instável: convecção muito forte

O valor deste parâmetro constitui também uma medida aproximada da velocidade dos movimentos verticais.

Número de Richardson “Bulk” (BRCH)

Este índice reflecte a estabilidade dinâmica do escoamento médio. Este parâmetro constitui um bom indicador de tempestades convectivas, envolvendo na sua determinação a energia cinética, através do CAPE, e a tensão tangencial vertical do vento. O BRCH através calcula-se através da seguinte expressão:

$$BRCH = \frac{CAPE}{0,5(U^2)}$$

em que:

U ($u_{6000}-u_{500}$, $v_{6000}-v_{500}$) ($m.s^{-1}$), onde U é a magnitude da velocidade do vento sendo u e v as componentes horizontais medidas aos níveis de pressão de 500 e 6000 hPa (URL 2).

Na Tabela AI 3 encontram-se os valores que o BRCH pode assumir, bem como o seu significado físico em termos de potencial convectivo.

Tabela AI 3: Valores de BRCH e seu significado físico em termos de potencial convectivo (URL 2).

BRCH	Potencial convectivo
0	Estável
< 10	Forte tensão tangencial do vento e CAPE reduzido. A tensão pode ser muito forte comparada com fraca força de flutuação sentida, para o desenvolvimento, ininterrupto, de uma corrente ascensional convectiva. Mas se o forçamento pela flutuação for suficiente, pode haver possibilidade de formação de tempestades
10 a 45	Forte tensão tangencial do vento e CAPE elevado: desenvolvimento de supercélulas
> 50	Fraca tensão tangencial do vento e CAPE elevado, sugerindo como provável o desenvolvimento de uma tempestade multicelular

Showalter Index (SWI)

O SWI baseia-se nas propriedades dos níveis de pressão de 850 e 500 hPa. Calcula-se pela comparação da temperatura final de uma parcela seca que sofre expansão desde os 850 mb até aos 500mb (adiabática seca até ao LCL, sofre saturação, seguindo depois a adiabática húmida até aos 500 mb); e a temperatura do ambiente aos 500 mb (URL 2).

Este parâmetro pode ser encontrado pela expressão:

$$SWI = T_{p500} - T_{amb500}$$

onde:

T_{p500} é a temperatura da parcela em expansão desde os 850 até aos 500 hPa (°C);

T_{amb500} é a temperatura do ambiente aos 500 hPa (°C) (URL 2).

Os valores que este índice pode apresentar e seus significados físicos em termos de potencial convectivos figuram na Tabela AI 4.

Tabela AI 4: Valores de SWI e seu significado físico em termos de estabilidade (URL 1; URL 2).

SWI	Potencial convectivo
> 0	Estável, mas para valores na gama de 1 a 2 pode surgir convecção, se uma forte força de flutuação estiver presente
- 3 a 0	Moderadamente instável: convecção moderada
- 6 a - 4	Muito instável: convecção forte
< - 6	Extremamente instável: convecção muito forte

K-Index (KI)

É um parâmetro baseado nas diferenças de temperatura e humidade da baixa atmosfera, a níveis de pressão específicos, e na extensão de camada húmida, sendo calculado através da expressão:

$$KI = (T_{amb850} - T_{amb500}) + (TD_{850} - (T_{amb700} - TD_{700})) \quad (5)$$

onde (URL 2):

T_{amb850} a temperatura do ambiente aos 800 mb (°C);

T_{amb500} a temperatura do ambiente aos 500 mb (°C);

T_{D850} a temperatura do ponto de orvalho aos 850mb (°C);

T_{amb700} a temperatura do ambiente aos 700mb (°C); e

T_{D700} a temperatura do ponto de orvalho aos 700 mb (°C).

A gama de valores que o KI pode apresentar e os respectivos significados físicos, em termos de potencial convectivo são apresentados na Tabela AI 5.

Tabela AI 5: Valores de KI e seu significado físico em termos de potencial convectivo (URL 1; URL 2).

KI	Potencial convectivo
0 a 15	Não há possibilidade de se formarem tempestades
18 a 19	A probabilidade de se formarem tempestades, é reduzida
20 a 25	Tempestades isoladas com chuva forte
30 a 40	Potencial elevado para a ocorrência de tempestades com chuva forte
> 40	Existência de tempestades com chuva forte

Note-se que quanto maior o KI, maior será a convecção da atmosfera, atingindo-se valores máximos de convecção para situações em que a baixa atmosfera está instável, geralmente $KI > 25$.

Sítios da Internet consultados

URL 1: <http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/SatManu/Basic/Convection/Parameters.htm>.
Sítio da Internet do Portal “Manual of synoptic satellite meteorology. Conceptual models and case studies. Financiado pelo EUMETSAT.

URL 2: <http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/indices.htm>. *Sítio da Internet do Portal do NOAA's National Weather Service Weather Forecast Office. Louisville, KY, USA.*

URL 3: <http://orbit35i.nesdis.noaa.gov/goes/soundings/skewt/html/skewtinf.html>

Anexo II

Estabilidade atmosférica e qualidade do ar: coeficientes de correlação

Coeficientes de correlação de Pearson e Spearman entre índices de estabilidade atmosférica e índices de qualidade do ar, definidos na secção § 4.2.2.

Ozono

ESTAÇÃO: ERM POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.3265	0.3325			-0.5026	jan	ano	0.3899	0.3877	0.2914	0.2929	-0.4612
	octo a	0.3464	0.3528			-0.4808		octo a	0.4051	0.4031	0.3059	0.3063	-0.3900
	octo b	0.2429	0.2497			-0.4504		octo b	0.3743	0.3717	0.2778	0.2788	-0.4315
	octo c	0.2642	0.2673			-0.3867		octo c	0.2879	0.2847	0.2185	0.2205	-0.3686
	8-20h	0.2658	0.2718			-0.4427		8-20h	0.4048	0.4022	0.3241	0.3249	-0.4333
	max	0.2769	0.2886			-0.3856		max	0.3543	0.3539	0.2941	0.2955	-0.3998
fev	ano	0.3009	0.3035	0.2421	0.2359	-0.5343	fev	ano	0.3882	0.3623	0.3734	0.3510	-0.4327
	octo a	0.3118	0.3163	0.2474	0.2484	-0.3571		octo a	0.3682	0.3683	0.3767	0.3874	-0.2509
	octo b					-0.428		octo b	0.1774				-0.4248
	octo c	0.313	0.3084	0.2774	0.2616	-0.5545		octo c	0.3186	0.2949	0.2352	0.2311	-0.4743
	8-20h		0.1629			-0.517		8-20h	0.2476	0.2098	0.2039		-0.4938
	max					-0.3129		max					-0.3159
mar	ano	0.2533	0.2654	0.2135	0.2137	-0.5226	mar	ano	0.3413	0.3330	0.3397	0.3405	-0.5478
	octo a	0.3277	0.3382	0.2275	0.2185	-0.5311		octo a	0.3880	0.3811	0.3853	0.3980	-0.5463
	octo b					-0.1868		octo b					-0.2316
	octo c					-0.4131		octo c	0.2354	0.2571	0.2501	0.2491	-0.4372
	8-20h					-0.2313		8-20h					-0.2633
	max							max					
nov	ano	0.1422	0.1669				nov	ano	0.2366	0.2599	0.1948	0.2086	-0.2221
	octo a							octo a	0.1691	0.1878			
	octo b	0.1852	0.1904			-0.15		octo b	0.2234	0.2287	0.2023	0.2051	-0.2803
	octo c							octo c		0.1642			
	8-20h	0.1733	0.1854					8-20h	0.2372	0.2561	0.2109	0.2242	-0.2564
	max	0.1459	0.164					max	0.2548	0.2772	0.2323	0.2357	-0.2416
dez	ano	0.3057	0.322			-0.4452	dez	ano	0.4903	0.4926	0.4885	0.4767	-0.4406
	octo a	0.3819	0.4014	0.2712	0.2649	-0.5053		octo a	0.5957	0.5965	0.6023	0.6023	-0.5083
	octo b	0.2303	0.2395			-0.3286		octo b	0.3537	0.3614	0.3624	0.3461	-0.3274
	octo c	0.2063	0.2179			-0.3189		octo c	0.3351	0.3341	0.3142	0.2967	-0.3551
	8-20h	0.2372	0.2465			-0.3359		8-20h	0.3656	0.3717	0.3723	0.3498	-0.3288
	max	0.245	0.2582	0.1782	0.1764	-0.3633		max	0.4350	0.4427	0.4653	0.4600	-0.3807

ESTAÇÃO: FEU POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup	Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.3441	0.3706			-0.4860	jan	ano	0.4545	0.4538	0.3620	0.3627	-0.5023
	octo a	0.3430	0.3582			-0.5099		octo a	0.4261	0.4254	0.3199	0.3182	-0.4966
	octo b	0.2848	0.3139			-0.4179		octo b	0.4464	0.4453	0.3848	0.3870	-0.4463
	octo c	0.2748	0.3163			-0.2192		octo c	0.3835	0.3844	0.3168	0.3178	-0.3208
	8-20h	0.3151	0.3467			-0.4096		8-20h	0.4595	0.4579	0.3932	0.3952	-0.4260
	max	0.3152	0.3380			-0.3768		max	0.3998	0.4026	0.3463	0.3475	-0.3988
fev	ano						fev	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					-0.3453
	octo c							octo c		0.3158			
	8-20h					-0.3607		8-20h					-0.4518
	max					-0.3385		max					-0.4275
mar	ano					-0.2679	mar	ano					-0.3565
	octo a					-0.2967		octo a					-0.3561
	octo b							octo b					
	octo c			0.2414				octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
nov	ano	0.4308	0.4341	0.2916	0.2926	-0.2317	nov	ano	0.4545	0.4613	0.4479	0.4427	-0.3903
	octo a	0.4042	0.4224	0.2062	0.2080			octo a	0.4507	0.4595	0.4175	0.4139	-0.3704
	octo b	0.4113	0.3934	0.3347	0.3346	-0.2978		octo b	0.3595	0.3568	0.3723	0.3612	-0.3549
	octo c	0.2242	0.2301					octo c	0.3140	0.3439	0.3192	0.3328	-0.2802
	8-20h	0.3830	0.3665	0.3374	0.3372	-0.2951		8-20h	0.3708	0.3799	0.3907	0.3870	-0.3677
	max	0.3739	0.3978					max	0.3453	0.3630	0.3026	0.2984	-0.3034
dez	ano	0.3166	0.3385			-0.4060	dez	ano	0.5393	0.5450	0.5168	0.4962	-0.3869
	octo a	0.3961	0.4247	0.2910	0.2897	-0.4892		octo a	0.7155	0.7207	0.7023	0.7102	-0.5305
	octo b	0.2362	0.2523			-0.2792		octo b	0.4025	0.4157	0.3528	0.3560	-0.2771
	octo c	0.2015	0.2145			-0.2671		octo c	0.3574	0.3810	0.3071	0.3099	-0.3265
	8-20h	0.2277	0.2405	0.2322	0.2331	-0.2636		8-20h	0.3893	0.4047	0.3382	0.3373	-0.2642
	max	0.2799	0.3011			-0.4320		max	0.5464	0.5426	0.5488	0.5259	-0.4043

ESTAÇÃO: FOR POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.3132	0.3224	0.2412	0.2431	-0.2838		ano	0.4097	0.4097	0.4096	0.4096	
	octo a	0.3785	0.3858					octo a	0.2689	0.2689	0.2589	0.2589	
	octo b					-0.2847		octo b	0.3707	0.3707	0.3678	0.3678	
	octo c					-0.2712		octo c	0.3287	0.3287	0.3230	0.3230	
	8-20h					-0.2727		8-20h	0.3784	0.3784	0.3759	0.3759	
	max	0.2569	0.2668					max	0.4360	0.4360	0.4376	0.4376	
fev	ano	0.4417	0.4374	0.3916	0.3874	-0.494		ano	0.3499	0.3201	0.3780	0.3290	-0.3851
	octo a	0.4158	0.4191	0.4221	0.4264	-0.3708		octo a	0.4027	0.4018	0.4130	0.4118	
	octo b	0.3922	0.3967	0.3158	0.3156	-0.6113		octo b			0.2617		-0.5566
	octo c	0.3282	0.3023	0.2446		-0.3098		octo c	0.3075	0.2386	0.3005	0.2358	-0.3563
	8-20h	0.3872	0.3828	0.2901	0.2833	-0.578		8-20h			0.2624		-0.5672
	max	0.267	0.2665	0.3198	0.3093	-0.5603		max			0.3251		-0.5358
mar	ano	0.2083	0.2238			-0.6075		ano	0.2150	0.1959	0.2044	0.2067	-0.6165
	octo a	0.2597	0.2746			-0.5666		octo a	0.3207	0.2840	0.3121	0.3239	-0.5584
	octo b					-0.4489		octo b					-0.4589
	octo c	0.2297				-0.51		octo c					-0.5026
	8-20h					-0.46		8-20h					-0.4641
	max					-0.5021		max					-0.4965
nov	ano			-0.3223	-0.3219	0.3463		ano			-0.2462	-0.2506	
	octo a			-0.2558	-0.2546	0.2854		octo a					
	octo b							octo b					
	octo c	-0.2276		-0.5045	-0.5045	0.5234		octo c	-0.3719	-0.3146	-0.5110	-0.5120	0.3835
	8-20h							8-20h					
	max			-0.3033	-0.3027	0.3191		max					
dez	ano	0.3852	0.3966			-0.2791		ano	0.4504	0.4768	0.4429	0.4603	-0.2678
	octo a	0.4104	0.4294	0.2772	0.2588	-0.3996		octo a	0.5180	0.5374	0.5192	0.5503	-0.3471
	octo b	0.2283	0.2349					octo b	0.2959	0.3080	0.2811	0.2860	
	octo c	0.3842	0.3859			-0.2861		octo c	0.3058	0.3505	0.2925	0.3000	
	8-20h	0.3105	0.3154					8-20h	0.3532	0.3867	0.3430	0.3548	
	max	0.3574	0.3692	0.2259				max	0.4534	0.4904	0.4503	0.4954	-0.2886

ESTAÇÃO: AVA POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.3606	0.3731	0.1805	0.1726	-0.3731		ano	0.3760	0.3566	0.3633	0.3482	-0.3361
	octo a	0.3886	0.4108	0.2392	0.2411	-0.4769		octo a	0.3912	0.3973	0.3801	0.3888	-0.3772
	octo b	0.3055	0.3142			-0.2994		octo b	0.3702	0.3311	0.3330	0.3066	-0.2838
	octo c	0.2576	0.2598			-0.1996		octo c	0.2519	0.2324	0.2211	0.2047	-0.1763
	8-20h	0.2954	0.3020			-0.2540		8-20h	0.3614	0.3244	0.3269	0.3006	-0.2411
	max	0.1664	0.1736					max	0.2527	0.2034	0.2509	0.2249	
fev	ano	0.2889	0.3090			-0.4006		ano	0.3534	0.3459	0.3416	0.3266	-0.3483
	octo a	0.3320	0.3539			-0.3208		octo a	0.4085	0.3924	0.4410	0.4205	-0.2512
	octo b	0.1873	0.2060			-0.3711		octo b	0.2321	0.2275	0.2292	0.2009	-0.3459
	octo c	0.2451	0.2579			-0.3870		octo c	0.2725	0.2714	0.2342	0.2405	-0.3462
	8-20h	0.1859	0.2031			-0.4068		8-20h	0.2132	0.2047	0.1987	0.1735	-0.3816
	max					-0.2794		max					-0.3091
mar	ano	0.1805	0.1874	-0.1548	-0.1532	-0.4241		ano	0.1571	0.1641	0.1575	0.1557	-0.4249
	octo a	0.2937	0.2988			-0.4979		octo a	0.3179	0.3037	0.3359	0.3320	-0.4667
	octo b			-0.1766	-0.1750	-0.3292		octo b					
	octo c			-0.1588	-0.1568			octo c					-0.3206
	8-20h			-0.1837	-0.1820			8-20h					
	max			-0.2029	-0.2012			max	-0.1926	-0.1670	-0.2067	-0.2047	
nov	ano	0.2090	0.2502					ano	0.3154	0.3528	0.2591	0.2835	-0.3048
	octo a					0.1630		octo a	0.1826	0.2045	0.1710	0.1804	-0.1783
	octo b	0.1966	0.2155					octo b	0.2973	0.3323	0.2510	0.2634	-0.2594
	octo c	0.1673	0.2042					octo c	0.2579	0.2904	0.1879	0.2217	-0.2249
	8-20h	0.1765	0.2040					8-20h	0.2952	0.3328	0.2226	0.2428	-0.2331
	max	0.1501	0.1661					max	0.2088	0.2359	0.1667	0.1714	-0.1697
dez	ano	0.3119	0.3314	0.1844	0.1843	-0.3762		ano	0.4717	0.4861	0.4693	0.4673	-0.2930
	octo a	0.2232	0.2424	0.1906	0.1954	-0.3951		octo a	0.4619	0.4711	0.4588	0.4597	-0.3002
	octo b	0.3729	0.3916	0.2308	0.2295	-0.3580		octo b	0.3788	0.4068	0.4072	0.4085	-0.3166
	octo c	0.1899	0.2009			-0.1698		octo c	0.2498	0.2531	0.2403	0.2331	
	8-20h	0.3756	0.3940	0.1837	0.1805	-0.3470		8-20h	0.4074	0.4259	0.4305	0.4261	-0.2826
	max							max	0.2061	0.2211	0.2371	0.2449	

ESTAÇÃO: COI POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.34850	0.35190	0.21320	0.20600	-0.43450	jan	ano	0.3984	0.3882	0.3472	0.3446	-0.4334
	octo a	0.43800	0.44840	0.26610	0.26310	-0.54390		octo a	0.4392	0.4330	0.3883	0.3867	-0.5011
	octo b	0.18640	0.18770			-0.29630		octo b	0.2876	0.2504	0.2313	0.2030	-0.3102
	octo c	0.27290	0.26900	0.16720		-0.25090		octo c	0.3481	0.3490	0.2875	0.2847	-0.2848
	8-20h	0.20280	0.20380			-0.25680		8-20h	0.3142	0.2850	0.2535	0.2327	-0.2849
	max	0.27280	0.27900			-0.35560		max	0.3590	0.3372	0.3055	0.3027	-0.3614
fev	ano	0.16950	0.17430			-0.18540	fev	ano					
	octo a	0.27990	0.29510					octo a	0.1531	0.1470	0.2174	0.2277	
	octo b							octo b					
	octo c					-0.19720		octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
mar	ano			-0.16940	-0.16940	-0.36660	mar	ano					
	octo a	0.21890	0.22450			-0.42260		octo a	0.2102	0.2156	0.1533	0.1613	-0.3824
	octo b			-0.18300	-0.18230	-0.16800		octo b					-0.1605
	octo c					-0.31610		octo c					-0.2521
	8-20h			-0.18060	-0.18000	-0.18630		8-20h					-0.1783
	max			-0.16950	-0.16970	-0.16860		max					-0.1981
nov	ano						nov	ano	0.1803	0.2038	0.1696	0.1682	-0.1759
	octo a		0.14380					octo a	0.1414	0.1552			-0.1812
	octo b	0.19190	0.18360	0.26240	0.26130	-0.18500		octo b	0.2650	0.2846	0.2636	0.2618	-0.2646
	octo c							octo c					
	8-20h	0.13740		0.22370	0.22250			8-20h	0.2284	0.2471	0.2363	0.2363	-0.1856
	max	0.15920	0.16450	0.14680	0.14680			max	0.2187	0.2334	0.2242	0.2160	-0.2614
dez	ano						dez	ano	0.5827	0.5780	0.5412	0.5388	-0.4263
	octo a							octo a	0.6025	0.6147	0.6147	0.6229	-0.4669
	octo b							octo b	0.4637	0.4568	0.4547	0.4332	-0.3550
	octo c							octo c	0.3471	0.3481	0.3031	0.3106	-0.2188
	8-20h							8-20h	0.4525	0.4458	0.4392	0.4264	-0.3110
	max							max	0.5817	0.5684	0.5493	0.5442	-0.4662

ESTAÇÃO: PEGO POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	-0.2580	-0.2832				jan	ano	-0.2877	-0.2863	-0.3293	-0.3281	
	octo a		-0.2490			-0.3498		octo a					-0.2995
	octo b		-0.2183					octo b	-0.3663	-0.3666	-0.3805	-0.3782	0.2074
	octo c	-0.2084	-0.2357					octo c	-0.4223	-0.4253	-0.4298	-0.4345	
	8-20h							8-20h	-0.3065	-0.3067	-0.2318	-0.2312	
fev	max						fev	max	-0.3843	-0.3851	-0.3371	-0.3364	
	ano	-0.2116	-0.2195					ano			-0.3122	-0.2816	
	octo a	-0.1903	-0.1966					octo a		0.1887			
	octo b	-0.2208	-0.2285					octo b	-0.2639	-0.2307	-0.3634	-0.3172	
	octo c				-0.2385	0.2554		octo c	-0.2656	-0.2532	-0.3802	-0.3434	
mar	8-20h						mar	8-20h	-0.2937	-0.2664	-0.4025	-0.3453	
	max							max	-0.3886	-0.3458	-0.4619	-0.3932	0.2488
	ano					-0.3564		ano					
	octo a							octo a	0.2681	0.2833	0.2549	0.2515	-0.4089
	octo b	-0.2119						octo b	-0.2458	-0.2668	-0.2561	-0.2963	
nov	octo c						nov	octo c					
	8-20h					-0.3564		8-20h	-0.2679	-0.2695	-0.2583	-0.2833	
	max							max	-0.3012	-0.3105	-0.2922	-0.3171	0.2711
	ano	-0.4489	-0.4313	-0.4554	-0.4557	0.4655		ano	-0.4423	-0.4351	-0.4664	-0.4579	0.3245
	octo a	-0.1916	-0.1827	-0.1968	-0.1968	0.2024		octo a					
dez	octo b	-0.5663	-0.5525	-0.5494	-0.5497	0.5595	dez	octo b	-0.5640	-0.5550	-0.5827	-0.5692	0.4072
	octo c	-0.3864	-0.3591	-0.4347	-0.4349	0.4411		octo c	-0.4802	-0.4720	-0.5225	-0.5194	0.4343
	8-20h	-0.5545	-0.5367	-0.5550	-0.5553	0.5620		8-20h	-0.5627	-0.5537	-0.5892	-0.5780	0.4381
	max	-0.5354	-0.5255	-0.5240	-0.5245	0.5257		max	-0.5736	-0.5688	-0.5988	-0.5902	0.4426
	ano	0.1935	0.2131					ano	0.4782	0.4769	0.4413	0.4657	
dez	octo a		0.2125	0.2147	0.2283		dez	octo a	0.4983	0.4951	0.4819	0.5061	
	octo b	0.2055	0.2212					octo b	0.4384	0.4379	0.3925	0.4166	
	octo c							octo c	0.4126	0.4146	0.3625	0.3947	0.2103
	8-20h	0.2100	0.2257					8-20h	0.4446	0.4452	0.3971	0.4208	
	max	0.2176	0.2417					max	0.3826	0.3866	0.3548	0.3760	0.2132

ESTAÇÃO: ENT POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.2599	0.3012			-0.3195	jan	ano	0.4180	0.4218	0.4057	0.4089	-0.3209
	octo a	0.3490	0.3886			-0.3424		octo a	0.4776	0.4838	0.4301	0.4318	-0.2498
	octo b		0.2124	0.2319	0.2381	-0.2689		octo b		0.2125			-0.2340
	octo c							octo c	0.2145	0.2100	0.2478	0.2496	-0.2564
	8-20h		0.2203			-0.2801		8-20h	0.2576	0.2637	0.2768	0.2804	-0.2739
	max		0.4034	0.2456	0.2411	-0.3712		max	0.4396	0.4412	0.4256	0.4289	-0.3700
fev	ano					-0.3933	fev	ano	0.2164		0.2546		-0.2606
	octo a	0.2825	0.2738			-0.3672		octo a	0.3189	0.2922	0.2651	0.2639	-0.2602
	octo b					-0.2720		octo b					
	octo c					-0.2972		octo c					
	8-20h					-0.3144		8-20h					
	max	0.2356	0.2330			-0.3412		max					-0.1985
mar	ano					-0.3083	mar	ano					
	octo a	0.2837	0.2979	0.2841	0.2991	-0.4230		octo a	0.2487	0.2714	0.3068	0.3239	-0.4108
	octo b							octo b					
	octo c					-0.1936		octo c					-0.2495
	8-20h							8-20h	-0.2064	-0.2006		-0.1948	
	max							max					
nov	ano			-0.2252	-0.2251	0.2497	nov	ano			-0.1749	-0.1799	
	octo a					0.1650		octo a					
	octo b			-0.2154	-0.2152	0.2103		octo b	-0.1697	-0.1740	-0.1803	-0.1756	
	octo c			-0.1942	-0.1941	0.2063		octo c			-0.1693		
	8-20h			-0.2470	-0.2468	0.2457		8-20h	-0.1921	-0.1926	-0.2186	-0.2062	
	max	-0.1663		-0.3366	-0.3364	0.3489		max			-0.2026	-0.2110	
dez	ano	0.2348	0.2563			-0.2977	dez	ano	0.4239	0.4519	0.3856	0.4111	-0.3948
	octo a	0.2819	0.3067			-0.3506		octo a	0.4801	0.5062	0.4575	0.4881	-0.4143
	octo b							octo b	0.3181	0.3583	0.2777	0.2831	-0.2695
	octo c							octo c					-0.3315
	8-20h							8-20h	0.2287	0.2706			-0.2060
	max	0.2715	0.2938			-0.4696		max	0.4012	0.4553	0.3732	0.4269	-0.4996

ESTAÇÃO: HVE POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.1594	0.1678			-0.4742	jan	ano	0.2490	0.2633	0.2356	0.2529	-0.3907
	octo a	0.1615	0.1663			-0.4436		octo a	0.2197	0.2319	0.2078	0.2221	-0.3177
	octo b					-0.5050		octo b	0.2545	0.2684	0.2446	0.2611	-0.4398
	octo c					-0.3826		octo c					-0.3649
	8-20h					-0.4670		8-20h	0.2295	0.2433	0.2134	0.2299	-0.4312
	max					-0.3822		max	0.2475	0.2676	0.2493	0.2727	-0.3729
fev	ano	0.4093	0.4085	0.3670	0.3539	-0.6458	fev	ano	0.3674	0.3492	0.3674	0.3340	-0.5282
	octo a	0.3631	0.3659	0.2809	0.2712	-0.5428		octo a	0.3435	0.3321	0.3026	0.3014	-0.4143
	octo b	0.3488	0.3502	0.3274	0.3188	-0.5625		octo b	0.2960	0.2821	0.3443	0.3190	-0.4746
	octo c	0.3488	0.3426	0.3529	0.3366	-0.5680		octo c	0.2365	0.2084	0.2633		-0.4775
	8-20h	0.3703	0.3698	0.3558	0.3444	-0.5914		8-20h	0.3002	0.2869	0.3398	0.3038	-0.5036
	max	0.2725	0.2729	0.2909	0.2848	-0.4589		max	0.2453	0.2273	0.3179	0.2500	-0.4123
mar	ano					-0.3959	mar	ano	0.1983	0.1918	0.2200	0.2313	-0.4358
	octo a		0.1453			-0.3697		octo a	0.2429	0.2320	0.2592	0.2689	-0.3905
	octo b					-0.3704		octo b			0.1574	0.1716	-0.3683
	octo c					-0.3717		octo c			0.1510	0.1600	-0.3651
	8-20h					-0.3573		8-20h					-0.3575
	max					-0.2222		max					-0.1920
nov	ano			-0.1955	-0.1949	0.1793	nov	ano					
	octo a			-0.1664	-0.1657	0.1628		octo a					-0.1635
	octo b			-0.1507	-0.1498			octo b					
	octo c			-0.1481	-0.1480			octo c					
	8-20h			-0.1583	-0.1579			8-20h					
	max			-0.2290	-0.2275	0.2175		max					
dez	ano	0.2434	0.2606			-0.4436	dez	ano	0.4806	0.4828	0.4678	0.4767	-0.4223
	octo a	0.3186	0.3397	0.2284	0.2308	-0.4430		octo a	0.5519	0.5572	0.5666	0.5825	-0.4234
	octo b	0.2094	0.2266			-0.3594		octo b	0.4368	0.4448	0.4201	0.4334	-0.3291
	octo c					-0.3692		octo c	0.3460	0.3418	0.3084	0.3106	-0.3350
	8-20h	0.1684	0.1837			-0.3648		8-20h	0.4162	0.4203	0.3891	0.3968	-0.3303
	max	0.2502	0.2637	0.1777	0.1763	-0.4425		max	0.4486	0.4734	0.4510	0.4629	-0.4241

ESTAÇÃO: MVE POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.1229	0.1422	0.1196	0.1214	-0.2562	jan	ano	0.2451	0.2244	0.2283	0.2071	-0.2955
	octo a	0.1747	0.1959	0.1496	0.1575	-0.3137		octo a	0.3208	0.3023	0.2931	0.2847	-0.2720
	octo b							octo b	0.1361		0.1438		
	octo c					-0.2615		octo c	0.2140	0.2097	0.1999	0.1802	-0.3106
	8-20h							8-20h	0.1612	0.1397	0.1739	0.1441	
fev	max						fev	max					
	ano					-0.1859		ano					-0.1646
	octo a	0.1152	0.1249			-0.2474		octo a	0.2167	0.2042	0.1681	0.1741	-0.2229
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
mar	8-20h						mar	8-20h					
	max					0.1990		max	-0.1855	-0.1831	-0.1555	-0.1526	0.2209
	ano					-0.4027		ano					-0.4588
	octo a	0.1393	0.1490			-0.3779		octo a	0.1406	0.1501	0.1637	0.1697	-0.3964
	octo b					-0.2019		octo b					-0.2742
nov	octo c					-0.2779	nov	octo c					-0.3575
	8-20h							8-20h					
	max							max	-0.1513	-0.1556	-0.1394	-0.1410	
	ano	0.1221	0.1261					ano					
	octo a							octo a					
dez	octo b	0.1891	0.1877	0.1476	0.1476		dez	octo b		0.1291			
	octo c	0.1495	0.1582					octo c					
	8-20h	0.1694	0.1665	0.1174	0.1174			8-20h					
	max	0.1470	0.1343	0.1757	0.1754			max		0.1226			0.2006
	ano	0.1641	0.1720	0.1417	0.1442	-0.3143		ano	0.1769	0.2435	0.2117	0.2629	-0.4297
dez	octo a	0.1854	0.1918	0.2008	0.2041	-0.4273	dez	octo a	0.2350	0.2970	0.2792	0.3210	-0.5119
	octo b	0.1549	0.1621	0.1406	0.1428			octo b	0.1647	0.2183	0.1787	0.2311	-0.1987
	octo c					-0.2945		octo c		0.1657	0.1311	0.1689	-0.3501
	8-20h	0.1341	0.1412	0.1175	0.1193	-0.1430		8-20h	0.1689	0.2275	0.1863	0.2400	-0.2466
	max							max					

ESTAÇÃO: SCA POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano					-0.2631	jan	ano					-0.2269
	octo a	0.2158				-0.4363		octo a					-0.3019
	octo b					-0.2116		octo b					-0.2500
	octo c							octo c	-0.2137	-0.2142			
	8-20h							8-20h					
fev	max					-0.3807	fev	max					-0.3073
	ano							ano	-0.2805	-0.2500			
	octo a							octo a	-0.2424	-0.2367			
	octo b							octo b					
	octo c	-0.2496	-0.2496					octo c	-0.2875	-0.2773		-0.2823	
mar	8-20h		-0.2264				mar	8-20h	-0.2574				
	max							max					
	ano							ano	0.2235		0.2904	0.2952	
	octo a							octo a			0.2804	0.2871	
	octo b							octo b					
nov	octo c						nov	octo c			0.2623	0.2679	
	8-20h							8-20h			0.2404	0.2397	
	max							max			0.2456	0.2586	
	ano					-0.3787		ano	0.2741	0.3170	0.2846	0.2773	-0.3026
	octo a					-0.302		octo a	0.2255	0.2674			-0.2556
dez	octo b					-0.398	dez	octo b	0.3042	0.3441	0.3003	0.2858	-0.3188
	octo c					-0.3846		octo c	0.3141	0.3587	0.3446	0.3296	-0.3587
	8-20h					-0.3911		8-20h	0.2993	0.3408	0.3178	0.3051	-0.3249
	max					-0.3688		max	0.3018	0.3396	0.3073	0.2974	-0.2975
	ano							ano					
dez	octo a						dez	octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c			0.3029	0.3227	
	8-20h							8-20h					
	max							max					

ESTAÇÃO: MCH POLUENTE: OZONO

Pearson							Spearman						
Mês		CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup		Mês	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Psup
jan	ano	0.2084	0.2189			-0.3033	jan	ano	0.3366	0.3822	0.3017	0.3120	-0.4624
	octo a	0.2305	0.2407			-0.3400		octo a	0.3600	0.4026	0.3171	0.3274	-0.3831
	octo b	0.1947	0.2043			-0.2825		octo b	0.3057	0.3430	0.2732	0.2860	-0.4255
	octo c	0.1739	0.1846			-0.2980		octo c	0.2631	0.3111	0.2140	0.2214	-0.4594
	8-20h	0.2047	0.2144	0.1876	0.1877	-0.2750		8-20h	0.3119	0.3517	0.2797	0.2894	-0.4460
	max	0.1891	0.1996					max	0.2920	0.3325	0.2800	0.2716	-0.3217
fev	ano	0.3285	0.3187	0.3272	0.3255	-0.3859	fev	ano					-0.2819
	octo a	0.2793	0.2769	0.2647	0.2657	-0.3129		octo a	0.1845	0.1712			-0.2293
	octo b	0.3046	0.2930	0.3561	0.3538	-0.4106		octo b					-0.3514
	octo c	0.2762	0.2639	0.2356	0.2321	-0.3202		octo c					
	8-20h	0.3315	0.3192	0.3349	0.3322	-0.4113		8-20h					-0.3501
	max	0.2512	0.2489	0.1991	0.1995	-0.2264		max					-0.2430
mar	ano					-0.4479	mar	ano	0.2527	0.2413	0.2634	0.2435	-0.4871
	octo a					-0.4476		octo a	0.2527	0.2413	0.2634	0.2435	-0.4871
	octo b	0.1804	0.1800			-0.3554		octo b	0.2043	0.2000	0.2115	0.2074	-0.4226
	octo c					-0.3519		octo c					-0.3432
	8-20h					-0.3312		8-20h					-0.3733
	max							max					
nov	ano	-0.1471		-0.2620	-0.2612		nov	ano	-0.3197	-0.3411	-0.3693	-0.3599	
	octo a	-0.2780	-0.2648	-0.3970	-0.3966	0.2629		octo a	-0.3900	-0.4043	-0.4261	-0.4130	
	octo b			-0.2710	-0.2697			octo b	-0.3486	-0.3448	-0.4079	-0.3896	
	octo c			-0.2713	-0.2703			octo c	-0.3504	-0.3647	-0.3926	-0.3815	
	8-20h							8-20h	-0.3513	-0.3527	-0.4057	-0.3884	
	max			-0.2681	-0.2667			max	-0.2649	-0.2665	-0.2968	-0.2820	
dez	ano					-0.4276	dez	ano	0.1488	0.1673		0.1639	-0.3550
	octo a					-0.4072		octo a	0.1697	0.1879	0.1837	0.2027	-0.4112
	octo b					-0.3339		octo b	0.1804	0.2103	0.1594	0.1943	-0.2902
	octo c					-0.3570		octo c					-0.3052
	8-20h					-0.3337		8-20h		0.1627		0.1466	-0.2667
	max					-0.3154		max					-0.2749

Óxido de azoto (NO)

ESTAÇÃO: ERM

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês	ano	SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2406				0.2685	jan	ano	0.3996	0.3807	0.2643	-0.3257	0.4694
	octo a	0.3162	0.3082		-0.2809	0.4776		octo a	0.3632	0.3591		-0.3648	0.5536
	octo b				-0.3038	0.2475		octo b				-0.4144	0.3884
	octo c				-0.3038	0.2475		octo c				-0.4144	0.3884
	8-20h	0.2240	0.3249		-0.3394	0.4743		8-20h	0.3011	0.3565	0.2391	-0.4176	0.5666
fev	max				-0.3312	0.3915	fev	max	0.2648	0.2440		-0.3814	0.4482
	ano					0.2475		ano		0.2780	0.2779		0.3800
	octo a							octo a					0.3206
	octo b	0.2466		-0.2571		0.2150		octo b	0.3430	0.2150	0.2170	-0.2477	0.2477
	octo c	0.2466		-0.2571		0.2150		octo c	0.3430	0.2150	0.2170	-0.2477	0.2477
mar	8-20h	0.2541					mar	8-20h	0.3064				0.2376
	max	0.2853		-0.3057		0.2502		max	0.2722			-0.2503	0.2587
	ano	0.2760	0.3863	0.3858	-0.2465	0.4483		ano	0.3176	0.4411	0.4415	-0.3871	0.5110
	octo a							octo a		0.2491	0.2454		
	octo b	0.2304	0.2844	0.2821	-0.2355	0.4420		octo b		0.2121			0.4469
nov	octo c	0.2304	0.2844	0.2821	-0.2355	0.4420	nov	octo c		0.2121			0.4469
	8-20h					0.2523		8-20h	0.2407	0.2881	0.2826	-0.2259	0.3099
	max	0.3414	0.4036	0.3999	-0.3580	0.4688		max	0.3750	0.4483	0.4491	-0.4320	0.4826
	ano	0.3381	0.3363	0.3416	0.2587	-0.2741		ano	0.4926	0.5397	0.5520		
	octo a	0.3858	0.3805	0.3917	0.2950	-0.3239		octo a	0.4199	0.4647	0.4787		
dez	octo b	0.2617	0.2719	0.2727		-0.1992	dez	octo b	0.4177	0.4710	0.4780		
	octo c	0.2617	0.2719	0.2727		-0.1992		octo c	0.4177	0.4710	0.4780		
	8-20h	0.3699	0.3731	0.3801	0.2236	-0.2993		8-20h	0.4863	0.5367	0.5489		
	max	0.3211	0.3287	0.3313		-0.2572		max	0.4422	0.4926	0.5037		
	ano	0.2608	0.2160	0.2137	-0.3591	0.2523		ano	0.4034	0.4650	0.4610	-0.3689	0.3936
dez	octo a	0.2907	0.2951	0.2941	-0.2843	0.3308	dez	octo a	0.3040	0.4015	0.3992	-0.2617	0.2924
	octo b				-0.2411			octo b	0.2936	0.2929	0.2909	-0.3363	
	octo c				-0.2411			octo c	0.2936	0.2929	0.2909	-0.3363	
	8-20h				-0.2276	0.2054		8-20h	0.3113	0.3636	0.3617	-0.3369	0.1980
	max				-0.2190			max	0.3079	0.2609	0.2591	-0.3436	

ESTAÇÃO: FEU

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês	ano	SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano						jan	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
fev	max						fev	max					
	ano							ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
mar	8-20h						mar	8-20h					
	max							max					
	ano							ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
nov	octo c						nov	octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
	ano							ano					
	octo a							octo a					
dez	octo b						dez	octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
	ano							ano					

ESTAÇÃO: FOR

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2255	0.2825		-0.2695		jan	ano	0.3077	0.3225		-0.3544	0.2661
	octo a	0.2191						octo a	0.2740	0.2086			
	octo b	0.3354	0.3185		-0.2688	0.2169		octo b	0.3744	0.3474		-0.3355	0.2966
	octo c		0.2128		-0.2518			octo c	0.2366	0.2736		-0.4029	0.2185
	8-20h	0.2737	0.3147		-0.3108	0.2229		8-20h	0.3443	0.3740	0.2080	-0.3908	0.3143
	max		0.2489		-0.2780	0.2394		max	0.2920	0.3163		-0.3861	0.3237
fev	ano	0.3824	0.4002	0.4008	-0.2532	0.3747	fev	ano	0.5468	0.5242	0.5259	-0.4110	0.4222
	octo a		0.2366	0.2369				octo a	0.2933	0.3326	0.3324		0.2161
	octo b	0.2831			-0.2934	0.2031		octo b	0.3374		0.1988	-0.3429	0.1990
	octo c	0.3320	0.3904	0.3908		0.3575		octo c	0.4560	0.4672	0.4690	-0.3355	0.4502
	8-20h	0.3652	0.2678	0.2683	-0.2929	0.3544		8-20h	0.4555	0.3726	0.3762	-0.3786	0.3739
	max	0.4225	0.5099	0.5101	-0.2542	0.3658		max	0.5652	0.5976	0.5990	-0.4297	0.4139
mar	ano	0.4037	0.3702	0.3662	-0.4423	0.4397	mar	ano	0.3684	0.3599	0.3534	-0.4380	0.4510
	octo a	0.2606	0.2640	0.2605		0.2973		octo a	0.3237	0.2787	0.2730	-0.3035	0.3757
	octo b	0.3821	0.3115	0.3085	-0.3400	0.3564		octo b	0.4592	0.3549	0.3489	-0.4206	0.3892
	octo c	0.2868	0.2723	0.2692	-0.4312	0.3412		octo c	0.3115	0.3238	0.3185	-0.4070	0.4260
	8-20h	0.4025	0.3319	0.3280	-0.4683	0.3893		8-20h	0.4301	0.3521	0.3456	-0.4436	0.4130
	max	0.3453	0.3039	0.3004	-0.4543	0.3764		max	0.3047	0.2879	0.2820	-0.4135	0.3678
nov	ano	0.5919	0.5996	0.6006	0.4657	-0.5558	nov	ano	0.5431	0.6155	0.6185	0.2242	-0.2895
	octo a	0.5443	0.5446	0.5459	0.4727	-0.5067		octo a	0.5573	0.5959	0.5975	0.2321	
	octo b	0.4580	0.4643	0.4654	0.3534	-0.4316		octo b	0.4546	0.5176	0.5199		-0.2081
	octo c	0.4857	0.4938	0.4954	0.3739	-0.4590		octo c	0.4628	0.5257	0.5313		-0.2602
	8-20h	0.5793	0.5820	0.5884	0.4514	-0.5471		8-20h	0.5168	0.5827	0.5909	0.2224	-0.2862
	max	0.5184	0.5287	0.5297	0.3889	-0.4925		max	0.5113	0.5877	0.5919	0.2014	-0.3123
dez	ano	0.2744			-0.2650		dez	ano	0.2917	0.2795	0.2765	-0.2578	
	octo a	0.2437			-0.2552			octo a	0.3412	0.3529	0.3510	-0.2571	0.2536
	octo b							octo b		0.1869	0.1862		
	octo c	0.2223			-0.2393			octo c	0.2391	0.2578	0.2535	-0.2748	
	8-20h	0.1910			-0.1936			8-20h	0.2386	0.2632	0.2601	-0.2228	
	max	0.1855			-0.1902			max	0.3098	0.2639	0.2606	-0.2981	

ESTAÇÃO: AVA

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.3234	0.4860		-0.3314	0.3700	jan	ano	0.3724	0.5226	0.3978	-0.3858	0.4138
	octo a	0.3250	0.4538		-0.2807	0.3969		octo a	0.4076	0.5309	0.4087	-0.3512	0.4796
	octo b	0.3398	0.4829		-0.2940	0.3370		octo b	0.4062	0.5233	0.3979	-0.3713	0.4141
	octo c	0.2239	0.3902		-0.3193	0.2869		octo c	0.2342	0.4132	0.3165	-0.3624	0.3124
	8-20h	0.3411	0.5129		-0.3492	0.3491		8-20h	0.3917	0.5388	0.4194	-0.4085	0.3986
	max	0.3746	0.4925		-0.3720	0.3860		max	0.3741	0.4944	0.3702	-0.3734	0.3666
fev	ano	0.1847	0.3398	0.3402	-0.2345	0.2915	fev	ano	0.2511	0.3652	0.3669	-0.3049	0.2724
	octo a		0.2147	0.2150				octo a		0.2753	0.2774	-0.1830	
	octo b		0.3202	0.3212	-0.1735	0.2048		octo b	0.2117	0.3642	0.3672	-0.2471	0.1855
	octo c	0.2130	0.2972	0.2971	-0.2482	0.3336		octo c	0.2929	0.3624	0.3613	-0.3304	0.2782
	8-20h	0.1743	0.3199	0.3203	-0.2205	0.2744		8-20h	0.2458	0.3567	0.3597	-0.2863	0.2641
	max				-0.2514	0.2651		max	0.1729	0.2806	0.2825	-0.2638	0.2323
mar	ano	0.2599	0.3515	0.3486	-0.4056	0.4794	mar	ano	0.2760	0.3504	0.3471	-0.4621	0.4732
	octo a	0.2788	0.3405	0.3375	-0.3776	0.4172		octo a	0.2850	0.3452	0.3419	-0.4475	0.4189
	octo b	0.1836	0.2265	0.2251	-0.3500	0.3393		octo b	0.2007	0.2483	0.2470	-0.4419	0.3321
	octo c	0.1918	0.3191	0.3168	-0.3172	0.4653		octo c	0.2144	0.3069	0.3035	-0.3779	0.4639
	8-20h	0.1795	0.2338	0.2318	-0.3555	0.3653		8-20h	0.1797	0.2358	0.2332	-0.4177	0.3513
	max	0.2603	0.3458	0.3429	-0.3757	0.4299		max	0.2977	0.3640	0.3605	-0.4591	0.4564
nov	ano	0.3563	0.3718	0.3752	0.2266	-0.3119	nov	ano	0.4508	0.5962	0.6004		
	octo a	0.3777	0.3868	0.3891	0.2656	-0.3365		octo a	0.4566	0.5601	0.5656		
	octo b	0.2489	0.2548	0.2620		-0.2034		octo b	0.3726	0.4860	0.4929		
	octo c	0.2989	0.3184	0.3197	0.1935	-0.2695		octo c	0.3733	0.5270	0.5274		
	8-20h	0.3339	0.3478	0.3517	0.2130	-0.2936		8-20h	0.4415	0.5687	0.5727		
	max	0.3523	0.3685	0.3699	0.2185	-0.3175		max	0.4331	0.5586	0.5625		
dez	ano	0.1981	0.4051	0.4068	-0.2271	0.3948	dez	ano	0.3486	0.5766	0.5787	-0.3489	0.4799
	octo a	0.1771	0.3782	0.3793	-0.2251	0.3993		octo a	0.3130	0.5690	0.5698	-0.3182	0.4679
	octo b	0.1850	0.3778	0.3798	-0.2108	0.4017		octo b	0.3851	0.5942	0.5968	-0.3549	0.5131
	octo c	0.2061	0.4039	0.4056	-0.2192	0.3472		octo c	0.3441	0.5533	0.5552	-0.3462	0.4432
	8-20h	0.1843	0.4005	0.4024	-0.2138	0.3580		8-20h	0.3570	0.5885	0.5911	-0.3521	0.4710
	max	0.1943	0.3977	0.3996	-0.2110	0.3817		max	0.2942	0.5088	0.5118	-0.3044	0.3909

ESTAÇÃO: COI

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano					0.2118	jan	ano					0.2156
	octo a					0.2407		octo a					0.2802
	octo b							octo b					
	octo c					0.1920		octo c					0.2114
	8-20h							8-20h					0.1743
fev	max					0.1971	fev	max					0.2112
	ano							ano					
	octo a							octo a					-0.2155
	octo b							octo b					-0.1922
	octo c							octo c					
mar	8-20h						mar	8-20h					
	max							max					
	ano	0.3351	0.3483	0.3475	-0.3448	0.3950		ano	0.3221	0.3279	0.3273	-0.3283	0.3871
	octo a	0.3662	0.4122	0.4111	-0.3761	0.3096		octo a	0.3916	0.4471	0.4446	-0.4058	0.3888
	octo b	0.2964	0.2275	0.2274	-0.2905	0.2271		octo b	0.2765	0.1774	0.1782	-0.2345	0.2202
nov	octo c	0.2931	0.3282	0.3279	-0.3105	0.4536	nov	octo c	0.2827	0.3077	0.3076	-0.3208	0.4043
	8-20h	0.3292	0.2825	0.2830	-0.3165	0.3161		8-20h	0.3000	0.2298	0.2299	-0.2822	0.2815
	max	0.3155	0.3618	0.3609	-0.3678	0.3311		max	0.2368	0.3113	0.3106	-0.2953	0.3228
	ano	0.4129	0.4143	0.4158	0.3236	-0.3723		ano	0.4528	0.4740	0.4789		-0.1684
	octo a	0.4239	0.4214	0.4255	0.3395	-0.3853	dez	octo a	0.5335	0.5435	0.5520		
dez	octo b	0.1965	0.1922	0.1964				octo b	0.2919	0.2879	0.2970		
	octo c	0.4326	0.4400	0.4382	0.3514	-0.4047		octo c	0.4144	0.4584	0.4574	0.1948	-0.1950
	8-20h	0.3584	0.3593	0.3602	0.2884	-0.3198		8-20h	0.3903	0.4019	0.4065		
	max	0.4515	0.4558	0.4539	0.3878	-0.4274		max	0.4491	0.4783	0.4795	0.2345	-0.3050
mar	ano	0.3182	0.2461	0.2451	-0.3955	0.3550	mar	ano	0.4077	0.3245	0.3230	-0.4413	0.3640
	octo a	0.3025	0.3000	0.3004	-0.3486	0.3625		octo a	0.4152	0.4252	0.4249	-0.3926	0.4261
	octo b	0.2069			-0.3121	0.2252		octo b	0.2492			-0.3104	0.2260
	octo c	0.2883	0.2275	0.2260	-0.3604	0.2991		octo c	0.3846	0.3373	0.3358	-0.4522	0.3276
	8-20h	0.2479			-0.3710	0.2623		8-20h	0.2919	0.1807	0.1795	-0.3760	0.2396
nov	max	0.2533	0.2277	0.2272	-0.3504	0.3036	nov	max	0.3278	0.2887	0.2890	-0.3945	0.2960

ESTAÇÃO: PEGO

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2983			-0.2646		jan	ano					0.2191
	octo a	0.2258						octo a		-0.3683	-0.3756		
	octo b	0.3294			-0.3051	0.2564		octo b	0.2780			-0.3780	0.3502
	octo c							octo c		-0.3145	-0.3224		0.2447
	8-20h	0.2730			-0.2829			8-20h				-0.2859	0.3279
fev	max	0.2630			-0.2642		fev	max	0.2663			-0.4039	0.3545
	ano		0.2846	0.2847				ano	0.1915	0.2124	0.2164		
	octo a		0.2113	0.2111				octo a					
	octo b	0.2122	0.3162	0.3174				octo b	0.2285	0.2691	0.2723	-0.1982	
	octo c							octo c					-0.1978
mar	8-20h	0.2087	0.3195	0.3198			mar	8-20h	0.2120	0.2817	0.2855		
	max		0.2616	0.2620				max	0.3252	0.3887	0.3923	-0.2523	
	ano	0.5744	0.5886		0.2604	-0.2361		ano	0.5937	0.7605	0.2126	0.2806	-0.3791
	octo a	0.4313	0.5306		0.1866	-0.2032		octo a	0.4696	0.6418		0.1962	-0.2842
	octo b	0.8998	0.8469					octo b	0.9404	0.8094			
nov	octo c	0.6448	0.7945				nov	octo c	0.7490	0.6186			
	8-20h	0.9522	0.7410		0.2113	-0.2022		8-20h	0.9059	0.7663		0.2209	
	max	0.5922	0.3926					max	0.7963	0.5612			
	ano	-0.3656	-0.3518	-0.3527	-0.3722	0.3723		ano	-0.3630	-0.2867	-0.2917	-0.4962	0.6305
	octo a	-0.3455	-0.3331	-0.3335	-0.3520	0.3474	dez	octo a	-0.4313	-0.3907	-0.3941	-0.6074	0.6535
dez	octo b	-0.3268	-0.3142	-0.3154	-0.3524	0.3299		octo b	-0.2537			-0.4398	0.5454
	octo c	-0.2411	-0.2319	-0.2327	-0.2369	0.2531		octo c	-0.3785	-0.3062	-0.3130	-0.3394	0.4487
	8-20h	-0.3088	-0.2971	-0.2986	-0.3341	0.3214		8-20h	-0.2668			-0.4081	0.5426
	max	-0.2083	-0.1989	-0.1991	-0.2406	0.2274		max				-0.2991	0.4484
jan	ano	0.2983			-0.2646		jan	ano					0.2191
	octo a	0.2258						octo a		-0.3683	-0.3756		
	octo b	0.3294			-0.3051	0.2564		octo b	0.2780			-0.3780	0.3502
	octo c							octo c		-0.3145	-0.3224		0.2447
	8-20h	0.2730			-0.2829			8-20h				-0.2859	0.3279
fev	max	0.2630			-0.2642		fev	max	0.2663			-0.4039	0.3545

ESTAÇÃO: ENT

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson

Spearman

Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		0.2905			0.3583	jan	ano	0.3724	0.5226	0.3978	-0.3858	0.4138
	octo a		0.2174			0.2284		octo a	0.4076	0.5309	0.4087	-0.3512	0.4796
	octo b					0.3216		octo b	0.4062	0.5233	0.3979	-0.3713	0.4141
	octo c		0.3148			0.3250		octo c	0.2342	0.4132	0.3165	-0.3624	0.3124
	8-20h		0.2703			0.3879		8-20h	0.3917	0.5388	0.4194	-0.4085	0.3986
	max	0.2174	0.2747			0.3577		max	0.3741	0.4944	0.3702	-0.3734	0.3666
fev	ano					0.2305	fev	ano		0.2606	0.2625		
	octo a							octo a	0.2869	0.3224	0.3255		0.2152
	octo b							octo b					
	octo c		0.2067					octo c			0.2051		
	8-20h							8-20h					
	max							max		0.2599	0.2627		
mar	ano					0.2741	mar	ano					0.2218
	octo a	0.1906	0.3194	0.3187		0.3552		octo a	0.2750	0.3409	0.3406	-0.3379	0.3929
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h	-0.2090			0.2008			8-20h		-0.1910	-0.1884	0.1938	
	max		0.2860	0.2854		0.3346		max	0.1973	0.2678	0.2711	-0.2736	0.3525
nov	ano	-0.2434	-0.2305	-0.2299	-0.2754	0.2607	nov	ano				-0.2395	0.2629
	octo a	-0.2025	-0.1995	-0.1989	-0.2412	0.2243		octo a				-0.2195	0.2942
	octo b	-0.1795	-0.1716	-0.1696		0.1751		octo b					
	octo c				-0.2003	0.1671		octo c				-0.1821	
	8-20h	-0.1747			-0.1825	0.1810		8-20h					
	max	-0.2885	-0.2794	-0.2787	-0.3458	0.3083		max				-0.3277	0.3221
dez	ano					0.2037	dez	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max				-0.2153	0.2623		max					0.2211

ESTAÇÃO: HVE

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson

Spearman

Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano					-0.2343	jan	ano					-0.3136
	octo a					-0.2758		octo a					-0.3190
	octo b					-0.2648		octo b					-0.2981
	octo c							octo c					-0.2676
	8-20h							8-20h					-0.2703
	max							max					-0.2598
fev	ano	0.2092	0.1911	0.1921	-0.2045	0.5017	fev	ano	0.2517	0.2217	0.2242	-0.2105	0.5037
	octo a					0.3629		octo a					0.3793
	octo b	0.2177			-0.2092	0.4193		octo b	0.2728	0.2309	0.2336	-0.2165	0.3947
	octo c	0.1919	0.2352	0.2339	-0.1776	0.4782		octo c	0.2537	0.2480	0.2497		0.4917
	8-20h	0.2240	0.1953	0.1961	-0.2209	0.4753		8-20h	0.2511	0.2383	0.2411	-0.2169	0.4608
	max				-0.1975	0.4481		max					0.4593
mar	ano		0.1731	0.1722	-0.2268	0.2884	mar	ano				-0.2533	0.2151
	octo a		0.1760	0.1755	-0.2685	0.2415		octo a				-0.2726	0.1916
	octo b				-0.1798	0.2635		octo b				-0.2513	0.2364
	octo c		0.1617	0.1607	-0.1953	0.2766		octo c				-0.2334	0.1972
	8-20h				-0.1730	0.2796		8-20h				-0.2348	0.2449
	max		0.1908	0.1899	-0.2908	0.3365		max	0.1678	0.1715	0.1688	-0.3359	0.2680
nov	ano						nov	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max	0.1869	0.1860	0.1944				max					
dez	ano				-0.3380	0.2606	dez	ano				-0.2031	0.2550
	octo a							octo a					0.2122
	octo b							octo b					
	octo c	0.1838			-0.4043	0.2578		octo c				-0.1957	0.2050
	8-20h				-0.2867	0.1884		8-20h					
	max	0.2567	0.2084	0.2083	-0.4171	0.2939		max				-0.2103	0.2365

ESTAÇÃO: MVE

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês	ano	SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		0.2419				jan	ano	0.2875	0.3685	0.2638	-0.2439	0.2518
	octo a		0.2387					octo a		0.2833	0.2289		0.1891
	octo b	0.1969	0.2417			0.1737		octo b	0.2743	0.2989	0.1957	-0.2001	
	octo c		0.2040					octo c		0.2384	0.1811		0.1867
	8-20h		0.2273					8-20h	0.2687	0.3062	0.2039	-0.1941	0.1867
fev	max	0.2521	0.2776		-0.1782	0.2238	fev	max	0.3628	0.3949	0.3115	-0.2683	0.2692
	ano	0.2257	0.3687	0.3715		0.3344		ano	0.1952	0.2840	0.2892		0.3262
	octo a	0.1939	0.3832	0.3858		0.3357		octo a	0.2206	0.3346	0.3394		0.3140
	octo b	0.1802	0.3030	0.3054		0.2721		octo b	0.1694	0.2624	0.2692		0.2681
	octo c	0.2777	0.3454	0.3476	-0.1696	0.3351		octo c	0.2759	0.3136	0.3181		0.3283
mar	8-20h	0.2026	0.2959	0.2986		0.2825	mar	8-20h	0.1769	0.2595	0.2652		0.2942
	max							max		0.2108	0.2151		0.2368
	ano					-0.1878		ano					
	octo a					-0.1787		octo a					
	octo b							octo b					-0.1631
nov	octo c						nov	octo c					
	8-20h					-0.1597		8-20h					
	max							max					
	ano	0.4094	0.3990	0.4051	0.4006	-0.3990		ano	0.2706	0.1963	0.2139	0.3135	-0.4217
	octo a	0.3186	0.3097	0.3087	0.2844	-0.3306		octo a	0.3393	0.2702	0.2732	0.2614	-0.4087
dez	octo b	0.4084	0.3860	0.4051	0.4087	-0.3941	dez	octo b	0.3018	0.2303	0.2486	0.3657	-0.4466
	octo c	0.3461	0.3450	0.3449	0.3342	-0.3273		octo c	0.3293	0.3141	0.3162	0.3205	-0.4302
	8-20h	0.4397	0.4213	0.4358	0.4416	-0.4350		8-20h	0.2715	0.2093	0.2270	0.3693	-0.4498
	max	0.2405	0.2215	0.2367	0.2297	-0.2044		max				0.2383	-0.2924
	ano					0.2794		ano				-0.2340	0.3311
dez	octo a						dez	octo a					0.2982
	octo b					0.2797		octo b					0.3313
	octo c	0.2337			-0.2864	0.2141		octo c					0.3091
	8-20h					0.2305		8-20h					0.2634
	max	0.3097	0.2216	0.2199	-0.3671			max				-0.2645	0.3222

m?

m

mei

mei

mei

i

ESTAÇÃO: SCA

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês	ano	SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano				-0.2165	-0.2104	jan	ano					
	octo a					-0.3179		octo a					-0.2389
	octo b				-0.2534			octo b		0.2000			
	octo c				-0.2029	-0.2004		octo c					-0.2233
	8-20h				-0.2458			8-20h					
fev	max					-0.3194	fev	max					
	ano					0.5958		ano					0.4937
	octo a					0.6034		octo a					0.5121
	octo b					0.5956		octo b					0.4959
	octo c					0.5930		octo c					0.4858
mar	8-20h					0.5968	mar	8-20h					0.5161
	max					0.5988		max					0.5141
	ano							ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
nov	octo c						nov	octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
	ano	-0.2730	-0.2680	-0.2681		0.2739		ano				0.2554	
	octo a	-0.2409	-0.2346	-0.2347		0.2403		octo a	0.2240	0.2670	0.2665	0.3368	
dez	octo b	-0.2436	-0.2395	-0.2394		0.2348	dez	octo b				0.2762	
	octo c	-0.2482	-0.2464	-0.2467	-0.2915	0.2731		octo c	0.2693	0.2916	0.2911	0.2389	
	8-20h	-0.2998	-0.2934	-0.2935	-0.2572	0.3066		8-20h					
	max	-0.3074	-0.3037	-0.3042		0.2847		max					
	ano		-0.2612	-0.2630		-0.2420	dez	ano					-0.2366
dez	octo a		-0.2425	-0.2435		-0.3223		octo a					-0.2321
	octo b							octo b					-0.3302
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h		-0.2729	-0.2810		-0.2522
	max	-0.2262	-0.3355	-0.3357		-0.4296		max		-0.2367	-0.2457		-0.2679

ESTAÇÃO: MCH

POLUENTE:ÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		-0.3290				jan	ano	-0.3091	-0.4532	-0.4088		
	octo a		-0.4258					octo a	-0.2649	-0.4707	-0.3746		
	octo b							octo b		-0.5476	-0.4776		
	octo c							octo c	-0.2895				-0.2882
	8-20h							8-20h	-0.3174	-0.4492	-0.4509		
	max							max					
fev	ano						fev	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max					0.2146		max					0.2313
mar	ano						mar	ano					
	octo a		-0.1742	-0.1735		-0.2161		octo a					
	octo b							octo b					
	octo c					-0.1702		octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
nov	ano						nov	ano				-0.2086	
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c	0.2425			-0.2320	0.2407		octo c	0.2427			-0.2661	0.1872
	8-20h	0.2083			-0.1975			8-20h	0.1992			-0.2205	
	max	0.1929				0.2425		max					0.2186
dez	ano						dez	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c	0.2794	0.3054	0.3047		
	8-20h							8-20h					
	max							max					

Dióxido de azoto (NO₂)

ESTAÇÃO: ERM

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2505			-0.3429	0.2304	jan	ano	0.3006			-0.3755	0.2682
	octo a	0.2833				0.2729		octo a	0.3631	0.3155	0.2455	-0.2910	0.3366
	octo b	0.2376			-0.3026			octo b	0.2707			-0.3020	
	octo c				-0.3108			octo c				-0.4098	0.2401
	8-20h	0.2376			-0.3699			8-20h	0.2799			-0.3835	0.2415
	max							max				-0.2946	
fev	ano						fev	ano					0.3184
	octo a							octo a					0.2209
	octo b		-0.2443	-0.2443				octo b		-0.2623	-0.2620		0.2208
	octo c					0.2619		octo c					0.2904
	8-20h							8-20h					0.3099
	max							max					
mar	ano	0.2154	0.3062	0.3029	-0.2892	0.5014	mar	ano	0.2374	0.3253	0.3225	-0.2849	0.4776
	octo a	0.2784	0.3825	0.3802	-0.3484	0.5381		octo a	0.2365	0.3645	0.3656	-0.3364	0.5061
	octo b							octo b					
	octo c		0.2569	0.2529	-0.2455	0.4730		octo c		0.2513	0.2462	-0.2496	0.4774
	8-20h					0.3134		8-20h					0.2826
	max		0.2495	0.2435	-0.3393	0.3824		max	0.2174	0.2866	0.2834	-0.3578	0.4099
nov	ano	0.2062	0.2071	0.2112			nov	ano	0.3319	0.3772	0.3875		
	octo a	0.2476	0.2402	0.2429		-0.2072		octo a	0.3628	0.3607	0.3692		
	octo b							octo b					
	octo c	0.1877	0.1946	0.1960				octo c	0.3000	0.3536	0.3602		
	8-20h							8-20h	0.2181	0.2711	0.2824		
	max							max	0.1747	0.2182	0.2253		
dez	ano	0.2456	0.1740	0.1738	-0.2712	0.2441	dez	ano	0.2435	0.1939	0.1946	-0.2817	0.2605
	octo a	0.3165	0.2912	0.2907	-0.2906	0.4237		octo a	0.3050	0.3471	0.3464	-0.2804	0.4557
	octo b					0.1550		octo b					0.1686
	octo c	0.2295			-0.2900			octo c	0.2587	0.1795	0.1808	-0.3334	
	8-20h				-0.1734			8-20h	0.1698			-0.1941	0.1679
	max							max	0.2222			-0.2818	

ESTAÇÃO: FEU

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano												
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
	max												
fev	ano												
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
	max												
mar	ano												
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
	max												
nov	ano												
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
	max												
dez	ano												
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
	max												

ESTAÇÃO: FOR

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2683	0.3365	-0.2277	-0.2246	0.3669	jan	ano	0.2720	0.3166		-0.2773	0.3837
	octo a	0.2188	0.2847			0.3803		octo a	0.2306	0.2818			0.3432
	octo b		0.2162			0.2263		octo b					0.2843
	octo c	0.2975	0.3639	-0.2259	-0.3277	0.3617		octo c	0.2730	0.3365		-0.3608	0.3933
	8-20h	0.2569	0.3198		-0.2410	0.3123		8-20h	0.2558	0.3257		-0.2927	0.3792
	max	0.2849	0.3761	-0.2133	-0.2951	0.3834		max	0.2662	0.3624	0.2343	-0.3485	0.4213
fev	ano	0.4628	0.5207	0.5207	-0.3649	0.2081	fev	ano	0.4421	0.5394	0.5427	-0.3273	
	octo a	0.3843	0.3538	0.3533	-0.3204			octo a	0.4025	0.4010	0.4025	-0.3140	
	octo b	0.4079	0.3832	0.3830	-0.3418			octo b	0.3837	0.4064	0.4093	-0.2919	
	octo c	0.4573	0.6009	0.6014	-0.3391	0.2424		octo c	0.4530	0.6332	0.6365	-0.3305	
	8-20h	0.4545	0.5079	0.5081	-0.3685	0.2132		8-20h	0.4313	0.5329	0.5362	-0.3397	
	max	0.4737	0.6232	0.6235	-0.3612	0.2167		max	0.4794	0.6481	0.6505	-0.3731	
mar	ano	0.4171	0.3813	0.3755	-0.4227	0.4372	mar	ano	0.3818	0.3317	0.3218	-0.3722	0.4051
	octo a	0.3978	0.4132	0.4100	-0.2995	0.4222		octo a	0.3963	0.3828	0.3744	-0.3007	0.4082
	octo b	0.3624	0.2673	0.2641	-0.2971	0.2754		octo b	0.3758	0.2703	0.2619	-0.2967	0.2642
	octo c	0.2937	0.2740	0.2676	-0.4106	0.3523		octo c	0.2373			-0.3232	0.3196
	8-20h	0.3801	0.3008	0.2954	-0.4081	0.3401		8-20h	0.3677	0.2884	0.2791	-0.3413	0.3365
	max	0.2635	0.2397	0.2340	-0.3946	0.3291		max				-0.2730	0.2691
nov	ano	0.6866	0.6955	0.6962	0.6025	-0.6623	nov	ano	0.5253	0.5922	0.5945	0.4174	-0.4328
	octo a	0.5991	0.6066	0.6073	0.4667	-0.5721		octo a	0.6058	0.6629	0.6652	0.2623	-0.2757
	octo b	0.5623	0.5698	0.5707	0.5346	-0.5575		octo b	0.3217	0.3740	0.3770	0.4298	-0.4669
	octo c	0.6405	0.6501	0.6497	0.5894	-0.6226		octo c	0.5240	0.5830	0.5833	0.3856	-0.3912
	8-20h	0.6483	0.6529	0.6570	0.5936	-0.6317		8-20h	0.4344	0.4861	0.4929	0.4414	-0.4556
	max	0.5845	0.5958	0.5963	0.4995	-0.5648		max	0.4676	0.5403	0.5416	0.3492	-0.3855
dez	ano	0.2404	0.4063	0.4076	-0.2333	0.1896	dez	ano	0.2646	0.4717	0.4704	-0.2202	
	octo a	0.2707	0.4103	0.4118		0.3220		octo a	0.3268	0.5005	0.4998	-0.2062	0.3409
	octo b		0.2518	0.2543				octo b		0.2770	0.2777		
	octo c	0.2324	0.3923	0.3928	-0.2869			octo c	0.2513	0.4578	0.4549	-0.2751	
	8-20h	0.1951	0.3672	0.3685	-0.2226			8-20h	0.2120	0.4279	0.4265	-0.2037	
	max	0.2451	0.3682	0.3684	-0.3078			max	0.3082	0.4860	0.4840	-0.3264	

ESTAÇÃO: AVA

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2413		-0.1700	-0.1764	0.3754	jan	ano	0.2749			-0.2178	0.3781
	octo a	0.2725				0.4494		octo a	0.2591				0.4245
	octo b	0.2507		-0.2118		0.3550		octo b	0.2807				0.3831
	octo c			-0.1772	-0.1986	0.2239		octo c				-0.2386	0.2346
	8-20h	0.2354		-0.2128	-0.1737	0.3298		8-20h	0.2609			-0.2146	0.3450
	max	0.2335			-0.1790	0.2614		max	0.2709			-0.2602	0.2498
fev	ano	0.1769	0.3666	0.3675	-0.1766	0.1766	fev	ano	0.2141	0.3209	0.3227	-0.2073	
	octo a		0.3028	0.3043				octo a		0.2239	0.2270		
	octo b		0.2340	0.2351				octo b	0.1988	0.2617	0.2653		
	octo c	0.1735	0.3781	0.3784	-0.1795	0.2237		octo c	0.1831	0.3177	0.3184	-0.1778	
	8-20h	0.1734	0.3295	0.3302	-0.1789	0.2007		8-20h	0.2395	0.3230	0.3250	-0.2271	0.1643
	max		0.2887	0.2904				max		0.2462	0.2491		
mar	ano					0.2141	mar	ano		0.1553		-0.2357	0.2125
	octo a					0.2030		octo a	0.1616	0.1621	0.1556	-0.2674	0.2016
	octo b							octo b					
	octo c		0.1927	0.1896	-0.2128	0.2617		octo c		0.2168	0.2114	-0.2564	0.2860
	8-20h							8-20h					
	max		0.1556		-0.2578	0.2569		max		0.1809	0.1774	-0.3232	0.2628
nov	ano	0.3192	0.3312	0.3354	0.2313	-0.2833	nov	ano	0.2868	0.3968	0.4007		
	octo a	0.2073	0.2148	0.2123		-0.1830		octo a	0.2238	0.2589	0.2561		
	octo b	0.2477	0.2547	0.2614	0.2191	-0.2153		octo b	0.1825	0.2699	0.2752		
	octo c	0.2993	0.3133	0.3188	0.2172	-0.2676		octo c	0.2661	0.4034	0.4072		
	8-20h	0.3555	0.3665	0.3728	0.2911	-0.3227		8-20h	0.2933	0.4113	0.4163		
	max	0.2029	0.2156	0.2198		-0.1744		max	0.2402	0.3366	0.3393		
dez	ano	0.2576	0.4921	0.4928	-0.2450	0.3013	dez	ano	0.2928	0.5106	0.5117	-0.2543	0.2143
	octo a		0.4157	0.4160		0.2972		octo a		0.4208	0.4199		0.1890
	octo b	0.2166	0.4078	0.4098	-0.1578	0.2596		octo b	0.2562	0.4139	0.4164	-0.1689	0.2067
	octo c	0.3042	0.4462	0.4459	-0.3222	0.2543		octo c	0.3156	0.4602	0.4619	-0.3217	0.1948
	8-20h	0.3015	0.4805	0.4814	-0.2675	0.2831		8-20h	0.3244	0.4951	0.4977	-0.2706	0.2278
	max	0.2379	0.2337	0.2322	-0.2596	0.1795		max	0.2356	0.2313	0.2298	-0.2512	

ESTAÇÃO: COI

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano					0.1842	jan	ano					0.1795
	octo a					0.2683		octo a					0.2657
	octo b							octo b					
	octo c					0.1830		octo c					0.1902
	8-20h							8-20h					0.1765
	max							max					
fev	ano	0.2213	0.3336	0.3332		0.3666	fev	ano	0.2946	0.4352	0.4357	-0.2549	0.3567
	octo a	0.2887	0.3454	0.3463	-0.2122	0.3303		octo a	0.3829	0.4667	0.4684	-0.2772	0.3338
	octo b					0.2401		octo b		0.2494	0.2514		0.2601
	octo c		0.3883	0.3869		0.3513		octo c	0.2400	0.4312	0.4310		0.2991
	8-20h		0.2440	0.2431		0.3232		8-20h		0.3192	0.3197		0.3102
	max	0.2088	0.3459	0.3451		0.3190		max	0.2464	0.4023	0.4038		0.2737
mar	ano	0.3579	0.3363	0.3345	-0.3789	0.4174	mar	ano	0.3693	0.3495	0.3477	-0.3840	0.4156
	octo a	0.3263	0.3600	0.3576	-0.3190	0.3210		octo a	0.3911	0.4182	0.4147	-0.3702	0.3726
	octo b	0.2698	0.1795	0.1782	-0.2745	0.2576		octo b	0.2720	0.1812	0.1799	-0.2532	0.2657
	octo c	0.3260	0.3357	0.3329	-0.4058	0.4450		octo c	0.3322	0.3513	0.3490	-0.4222	0.4137
	8-20h	0.3322	0.2720	0.2707	-0.3490	0.3549		8-20h	0.3364	0.2822	0.2802	-0.3389	0.3505
	max	0.2553	0.2656	0.2631	-0.3621	0.3341		max	0.2565	0.2659	0.2649	-0.3811	0.3056
nov	ano	0.2372	0.2377	0.2401	0.1796	-0.1967	nov	ano	0.2644	0.2869	0.2896		
	octo a	0.3225	0.3211	0.3230	0.2591	-0.2866		octo a	0.2578	0.2688	0.2728		
	octo b							octo b	0.1479	0.1736	0.1780		
	octo c	0.2614	0.2656	0.2665	0.2101	-0.2283		octo c	0.2757	0.3121	0.3127		
	8-20h	0.1920	0.1932	0.1958	0.1609	-0.1568		8-20h	0.2058	0.2365	0.2393		
	max	0.2142	0.2186	0.2196	0.1726	-0.1819		max	0.2385	0.2745	0.2758		
dez	ano	0.2185	0.2660	0.2671	-0.2743	0.2710	dez	ano	0.1890	0.2495	0.2510	-0.2407	0.2843
	octo a		0.2167	0.2201	-0.1645	0.2295		octo a		0.2265	0.2294		0.2262
	octo b				-0.1946	0.1839		octo b					0.1598
	octo c	0.2047	0.2833	0.2834	-0.2831	0.2761		octo c	0.1984	0.2883	0.2889	-0.2546	0.3075
	8-20h		0.1786	0.1795	-0.2353	0.2247		8-20h		0.1526	0.1535	-0.1994	0.2235
	max	0.2551	0.2639	0.2639	-0.3272	0.2944		max	0.2411	0.2529	0.2542	-0.3027	0.2859

ESTAÇÃO: PEGO

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		0.2912			0.4399	jan	ano		0.3417	0.3204		0.4411
	octo a	0.2087	0.3376			0.5062		octo a		0.3543	0.3340		0.4873
	octo b					0.3178		octo b		0.3225	0.2899		0.3714
	octo c		0.2714			0.4103		octo c		0.3433	0.3263		0.4191
	8-20h		0.2651			0.3685		8-20h		0.3518	0.3306		0.4129
	max		0.2402			0.3382		max		0.2800	0.2759		0.3318
fev	ano	0.3449	0.4634	0.4651	-0.2766	0.2534	fev	ano	0.3440	0.4594	0.4605	-0.2888	
	octo a	0.2708	0.4138	0.4155	-0.2276			octo a	0.2687	0.4257	0.4273	-0.2348	
	octo b	0.2968	0.4166	0.4192	-0.2134	0.2154		octo b	0.2674	0.3827	0.3842	-0.2051	
	octo c	0.3754	0.4344	0.4354	-0.3025	0.3190		octo c	0.4093	0.4552	0.4558	-0.3491	0.2839
	8-20h	0.3760	0.4804	0.4821	-0.3019	0.3265		8-20h	0.3799	0.4847	0.4852	-0.3079	0.2337
	max	0.3428	0.4260	0.4253	-0.3135	0.2801		max	0.3610	0.4396	0.4413	-0.3234	0.2154
mar	ano		0.2604	0.2595	-0.2714	0.4517	mar	ano	0.2126	0.2806	0.2808	-0.3507	0.4671
	octo a		0.1866	0.1858	-0.2444	0.3901		octo a		0.1962	0.1962	-0.2952	0.3923
	octo b		0.2986	0.2985	-0.2775	0.3807		octo b	0.2227	0.3151	0.3168	-0.3642	0.4103
	octo c		0.2330	0.2319	-0.2405	0.4058		octo c	0.2153	0.2703	0.2701	-0.3512	0.3921
	8-20h		0.2810	0.2801	-0.2563	0.4416		8-20h	0.2095	0.3004	0.3011	-0.3515	0.4422
	max		0.2093	0.2076		0.3669		max		0.2411	0.2401	-0.2946	0.3766
nov	ano	-0.1909			-0.2407	0.2244	nov	ano				-0.2195	0.3670
	octo a	-0.2253	-0.2188	-0.2198	-0.3016	0.2563		octo a				-0.3001	0.3504
	octo b							octo b					0.2718
	octo c				-0.1942	0.1986		octo c					0.3305
	8-20h				-0.2007	0.1957		8-20h					0.3362
	max	-0.1946	-0.1832	-0.1843	-0.2154	0.2098		max				-0.1983	0.2892
dez	ano	0.2409	0.3039	0.3040	-0.2500	0.4136	dez	ano	0.2486	0.3177	0.3140	-0.2915	0.3656
	octo a		0.2517	0.2519		0.3994		octo a	0.2069	0.2824	0.2802	-0.2048	0.3531
	octo b		0.2766	0.2788		0.2714		octo b		0.2973	0.2961		0.2402
	octo c	0.2807	0.2505	0.2494	-0.3149	0.3859		octo c	0.2531	0.3023	0.2969	-0.3271	0.4315
	8-20h	0.2278	0.2908	0.2910	-0.2612	0.3652		8-20h	0.2158	0.3208	0.3172	-0.2737	0.3417
	max	0.2053			-0.2520			max	0.2066			-0.3149	0.3838

ESTAÇÃO: ENT

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		0.2180			0.2168	jan	ano	0.2204	0.2229		-0.2104	0.2053
	octo a	0.2548	0.2569					octo a	0.2962	0.2966	0.2729	-0.2338	
	octo b							octo b					
	octo c		0.2878		-0.2137	0.2118		octo c		0.2873	0.2487	-0.2817	0.2198
	8-20h							8-20h					
fev	max						fev	max				-0.2613	
	ano	0.2213	0.3336	0.3332		0.3666		ano	0.2946	0.4352	0.4357	-0.2549	0.3567
	octo a	0.2887	0.3454	0.3463	-0.2122	0.3303		octo a	0.3829	0.4667	0.4684	-0.2772	0.3338
	octo b					0.2401		octo b		0.2494	0.2514		0.2601
	octo c		0.3883	0.3869		0.3513		octo c	0.2400	0.4312	0.4310		0.2991
mar	8-20h		0.2440	0.2431		0.3232	mar	8-20h		0.3192	0.3197		0.3102
	max	0.2088	0.3459	0.3451		0.3190		max	0.246403	0.4023	0.4038		0.2737
	ano					0.2257		ano					
	octo a		0.2474	0.2497		0.3341		octo a		0.2242	0.2293		0.3108
	octo b	-0.1880						octo b	-0.2055				
nov	octo c					0.2087	nov	octo c					
	8-20h	-0.1867						8-20h	-0.1969				
	max							max					
	ano	-0.4962	-0.4942	-0.4924	-0.4585	0.5033		ano	-0.3533	-0.3301	-0.3255	-0.3942	0.5120
	octo a	-0.5058	-0.5044	-0.5022	-0.4719	0.5127		octo a	-0.3771	-0.3438	-0.3386	-0.4066	0.5653
dez	octo b	-0.4695	-0.4728	-0.4712	-0.4021	0.4754	dez	octo b	-0.3633	-0.3774	-0.3735	-0.3152	0.4821
	octo c	-0.3576	-0.3523	-0.3513	-0.3690	0.3737		octo c	-0.2013			-0.3351	0.3535
	8-20h	-0.4433	-0.4401	-0.4387	-0.3944	0.4491		8-20h	-0.3240	-0.2956	-0.2922	-0.3129	0.4590
	max	-0.5095	-0.5065	-0.5025	-0.4912	0.5147		max	-0.3435	-0.3010	-0.2931	-0.4197	0.5175
	ano							ano					
dez	octo a						dez	octo a					
	octo b							octo b					
	octo c				-0.2513			octo c				-0.2692	
	8-20h				-0.2043			8-20h					
	max				-0.2863			max				-0.2705	

ESTAÇÃO: HVE

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano		-0.2729				jan	ano		-0.3526	-0.3381		
	octo a							octo a		-0.2212	-0.4210	-0.3838	0.3183
	octo b		-0.3778		0.3156	-0.2589		octo b		-0.3754	-0.3119	0.2402	
	octo c		-0.2399					octo c		-0.3991	-0.3729	0.2954	
	8-20h		-0.3059		0.2462			8-20h		-0.2837	-0.2661		
fev	max						fev	max					
	ano							ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
mar	8-20h						mar	8-20h					
	max							max					
	ano				-0.1671			ano				-0.2567	
	octo a	0.2076	0.2361	0.2345	-0.2754	0.2491		octo a	0.2708	0.2421	0.2374	-0.3559	0.2086
	octo b							octo b				-0.1778	
nov	octo c						nov	octo c				-0.1603	
	8-20h							8-20h				-0.1680	
	max							max				-0.1766	
	ano	0.5180	0.5122	0.5161	0.4906	-0.4950		ano	0.3833	0.3323	0.3365	0.3413	-0.4184
	octo a	0.4936	0.4891	0.4925	0.4671	-0.4701		octo a	0.3853	0.3664	0.3694	0.3081	-0.3047
dez	octo b	0.3643	0.3598	0.3648	0.3643	-0.3464	dez	octo b	0.3018	0.2609	0.2655	0.2956	-0.3503
	octo c	0.5144	0.5076	0.5100	0.4587	-0.4938		octo c	0.3925	0.3219	0.3261	0.3267	-0.4336
	8-20h	0.4559	0.4514	0.4555	0.4360	-0.4376		8-20h	0.3267	0.2785	0.2834	0.3373	-0.4255
	max	0.5101	0.5031	0.5056	0.4760	-0.4986		max	0.3665	0.3097	0.3122	0.3507	-0.4449
	ano		0.2794	0.2794	0.2793	0.1983		ano		0.2698	0.2666		
dez	octo a	0.2448	0.3504	0.3504	0.3502	0.2786	dez	octo a	0.2719	0.3620	0.3581	-0.1950	0.2127
	octo b		0.1950	0.1950	0.1957			octo b		0.1980	0.1961		
	octo c		0.2488	0.2488	0.2482	0.1731		octo c		0.2327	0.2298		
	8-20h		0.2216	0.2216	0.2217			8-20h		0.2093	0.2067		
	max							max					

ESTAÇÃO: MVE

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	0.2227	0.2410		-0.2187	0.1907	jan	ano	0.2558	0.2446	0.2420	-0.2311	0.2446
	octo a		0.1842					octo a					
	octo b	0.2595	0.2090			0.1744		octo b	0.2670		0.1755		
	octo c	0.2068	0.2524		-0.2514	0.1956		octo c	0.2347	0.2804	0.2748	-0.2707	0.2980
	8-20h	0.2293	0.2125		-0.1965	0.1772		8-20h	0.2628	0.2265	0.2236	-0.1908	0.2149
fev	max	0.3069	0.3160		-0.2581	0.1900	fev	max	0.2970	0.2953	0.2491	-0.2568	0.2084
	ano		0.1665	0.1689		0.1954		ano					0.2129
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c		0.2253	0.2266		0.2235		octo c					0.2786
mar	8-20h					0.1725	mar	8-20h					0.1714
	max					0.1779		max					0.2143
	ano		0.2529	0.2549	-0.2028	0.2067		ano		0.2179	0.2226	-0.2382	
	octo a		0.2069	0.2079	-0.2026	0.2118		octo a		0.1968	0.2004	-0.2634	
	octo b							octo b					
nov	octo c	0.1911	0.3221	0.3236	-0.2347	0.3096	nov	octo c	0.1869	0.3060	0.3112	-0.2438	0.1687
	8-20h		0.2080	0.2107				8-20h		0.1957	0.2004	-0.2001	
	max		0.1870	0.1889				max		0.1793	0.1824		
	ano							ano					
	octo a	-0.2478	-0.2623	-0.2599	-0.2519	0.2703		octo a		-0.1818	-0.1775		
dez	octo b	-0.2093	-0.2221	-0.2192		0.2158	dez	octo b	-0.1770	-0.2687	-0.2651		
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
	ano							ano					
dez	octo a						dez	octo a					
	octo b	-0.2820						octo b	-0.2551				
	octo c					0.1867		octo c					0.1931
	8-20h							8-20h					
	max							max					

ESTAÇÃO: SCA

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano	-0.2976	-0.4372	-0.3774	0.2573	-0.4594	jan	ano	-0.2527	-0.3105	-0.2905	0.3128	
	octo a	-0.3622	-0.4305	-0.3836	0.3560	-0.4909		octo a	-0.3046	-0.3682	-0.3507	0.2973	
	octo b	-0.2665	-0.4198		0.2267	-0.4176		octo b	-0.2222	-0.2986	-0.2728	0.2830	
	octo c	-0.2256	-0.3930	-0.3415		-0.3833		octo c		-0.3182	-0.2928	0.2695	
	8-20h	-0.2576	-0.4323		0.2277	-0.4225		8-20h	-0.2078	-0.3300	-0.3015	0.3010	
fev	max	-0.3106	-0.4446	-0.3978	0.2847	-0.5263	fev	max	-0.2503	-0.3233	-0.3035	0.3217	
	ano					-0.6244		ano					-0.5912
	octo a					-0.6314		octo a					-0.6022
	octo b					-0.6198		octo b					-0.5924
	octo c					-0.6265		octo c					-0.6377
mar	8-20h					-0.6231	mar	8-20h					-0.5912
	max					-0.5889		max					-0.5786
	ano							ano					
	octo a							octo a				-0.2422	
	octo b							octo b					
nov	octo c						nov	octo c					
	8-20h							8-20h					
	max							max					
	ano							ano	0.4964	0.4939	0.4921	0.3576	-0.3851
	octo a							octo a	0.5608	0.5694	0.5692	0.4410	-0.4764
dez	octo b						dez	octo b	0.5202	0.5210	0.5192	0.4062	-0.4636
	octo c							octo c	0.5865	0.5627	0.5613	0.4988	-0.5636
	8-20h							8-20h	0.6107	0.5838	0.5822	0.4778	-0.5295
	max							max	0.4822	0.4812	0.4802	0.4036	-0.3913
	ano	-0.2568	-0.3258	-0.3251		-0.3975		ano	-0.3498	-0.2928	-0.2902	0.2490	-0.4739
dez	octo a		-0.2327	-0.2321		-0.3244	dez	octo a	-0.3137			0.2950	-0.4124
	octo b		-0.2583	-0.2584		-0.2744		octo b	-0.2551	-0.2297	-0.2308		-0.3662
	octo c	-0.2609	-0.3389	-0.3373		-0.3511		octo c	-0.3435	-0.2975	-0.2970	0.2631	-0.4820
	8-20h		-0.2953	-0.2940		-0.2509		8-20h	-0.3660	-0.3350	-0.3330	0.2563	-0.4733
	max	-0.2490	-0.3112	-0.3099		-0.4165		max	-0.3122	-0.2613	-0.2589		-0.4258

ESTAÇÃO: MCH

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson							Spearman						
Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup	Mês		SWI	LI	LIV	KI	Psup
jan	ano						jan	ano					
	octo a							octo a					
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max						max		0.3537				
fev	ano				0.2104		fev	ano	-0.2178				
	octo a				0.2309			octo a	-0.2305			0.2182	
	octo b							octo b	-0.2459			0.2467	
	octo c							octo c					
	8-20h					0.2095		8-20h	-0.2106				
	max	-0.2070			0.2396	0.2488		max	-0.2378			0.2260	
mar	ano				-0.2616	0.2519	mar	ano				-0.2516	0.2268
	octo a				-0.2554	0.2250		octo a				-0.2549	0.1969
	octo b				-0.1905			octo b				-0.2462	
	octo c				-0.2001	0.2472		octo c				-0.1688	0.1976
	8-20h				-0.2054	0.2196		8-20h				-0.1970	0.1778
	max				-0.1907	0.2583		max				-0.1900	0.1990
nov	ano						nov	ano					
	octo a							octo a	0.2278	0.1835			-0.2267
	octo b							octo b					
	octo c							octo c					
	8-20h							8-20h					
	max						max						
dez	ano	-0.3178					dez	ano	-0.3365				-0.4447
	octo a	-0.2537						octo a	-0.2918				-0.3647
	octo b	-0.3127				-0.3546		octo b	-0.2640				-0.4004
	octo c	-0.2961				-0.2452		octo c	-0.3429			0.2252	-0.3202
	8-20h					-0.2991		8-20h	-0.2675				-0.4290
	max	-0.3642	-0.2927	-0.2915	0.2460		max	-0.4195	-0.2605	-0.2666	0.2833	-0.4238	

Monóxido de carbono (CO)

Person	Mês	Spearman									
		SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup	Mas
jan	ano					-0.2655	-0.2891			0.2682	
	ciclo a									0.1707	
	ciclo b									0.2274	
	ciclo c					-0.2447	-0.2656			0.2192	
	max					-0.2378	-0.261			0.2294	
fev	ano	0.2183	0.2846	0.2843						0.2268	
	ciclo a	0.2204	0.2223								
	ciclo b	0.2494	0.208	0.2081						0.2374	
	ciclo c	0.2112	0.2107	0.2116						0.2196	
	max	0.2226	0.3236	0.3239						0.2284	
mar	ano	-0.2133			0.1908						
	ciclo a	-0.2026	-0.2778	-0.276	0.2417					-0.2315	
	ciclo b	-0.2503								0.2326	
	ciclo c	-0.3272	-0.3326	-0.3305	0.3224					-0.2427	
	max						0.2994	0.299	0.2928		
abr	ano					0.2206	0.2114	0.2326	0.3039	0.2925	
	ciclo a							0.3216	0.338		
	ciclo b					0.2265	0.2295	0.3612	0.3615		
	ciclo c								0.2029		
	max										
maio	ano					0.2536	0.2852				
	ciclo a	-0.3594	-0.3707	-0.3699	0.3241					-0.2281	
	ciclo b										
	ciclo c										
	max										
jun	ano					-0.4707	-0.4331			0.3502	
	ciclo a	-0.3807	-0.3804		0.3781					0.1813	
	ciclo b	-0.3813	-0.3822	-0.3411						0.1813	
	ciclo c	-0.4362	-0.4136	-0.3654						0.3232	
	max	-0.3719	-0.3271	-0.3249						0.311	
jul	ano	-0.2529	-0.2773	-0.2739						-0.4852	
	ciclo a	-0.2502	-0.2672	-0.2672						-0.2529	
	ciclo b	-0.4446	-0.3848	-0.387						-0.4852	
	ciclo c	-0.3602	-0.3124	-0.3129						-0.5207	
	max	-0.2321									
ago	ano	-0.2657		-0.2193							
	ciclo a	-0.2794				-0.2204					
	ciclo b										
	ciclo c										
	max										
set	ano	0.2719	0.2624	0.2653	-0.1773	-0.2326	0.2412	-0.2773	-0.291		
	ciclo a	0.223	0.2284	0.2274		-0.2051	0.2186	-0.2326	-0.2475		
	ciclo b	0.2471	0.2114	0.2107	-0.1739	-0.2048	-0.2072	-0.2475	-0.2556		
	ciclo c	0.2002	0.2298	0.2282		-0.1954	-0.2023	-0.2628	-0.2771		
	max	0.2213	0.2376	0.2342		-0.2059	-0.213	-0.2578	-0.2743		
out	ano	0.2002	0.2298	0.2282		-0.1954	-0.2023	-0.2628	-0.2771		
	ciclo a	-0.225	-0.213	-0.2115	-0.3307	-0.2836	-0.2742	-0.2683	-0.2686	0.259	
	ciclo b	-0.2768	-0.2607	-0.2616	-0.3114	-0.2868	-0.2669	-0.3079	-0.309	0.3008	
	ciclo c	-0.1953	-0.195	-0.1938	-0.2778	-0.2719	-0.2729	-0.2374	-0.2383	0.2293	
	max	-0.2676	-0.2543	-0.2531	-0.3692	-0.2788	-0.2772	-0.3085	-0.3096	0.2994	
nov	ano				-0.271					-0.2576	
	ciclo a										
	ciclo b										
	ciclo c										
	max										
dez	ano										
	ciclo a										
	ciclo b										
	ciclo c										
	max										

ESTAÇÃO: FOR

POLUENTE: DÍÓXIDO DE AZOTO

Pearson	Mês	Spearman																			
		SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup	Mês	SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup	
jan	ano	-3058	-4214			-3001	-2310	-2283		-3325		ano	-0.3243	0.4523	0.3294	-0.3829	-0.4951	-0.4926	-0.4570	0.3757	
	octo a	-3647	-4215		-3058	-3114	-3165	-1859		-3676		octo a	0.3245	0.4038	0.3071	-0.2461	-0.4893	-0.4892	-0.4303	-0.4292	0.3692
	octo b	-2278			-1859	-1932					jan	0.3796	0.4977	0.3831	-0.3550	-0.4870	-0.4838	-0.4455	-0.4447	0.4138	
	octo c	-2448	-3854		-3385	-2454	-2631			-3365		octo b	0.2150	0.3587	0.2488	-0.3446	-0.4307	-0.4284	-0.3950	0.3413	
	max	-2303	-3688		-2302	-2671	-2650			-2527		max	0.3240	0.4755	0.2488	-0.3779	-0.5117	-0.5090	-0.4749	-0.4746	0.3861
fev	ano	-2454	-3243	3298		-2604	-2663	-2702	-1871	-2283		ano	0.2706	0.3285	0.2488	-0.3291	-0.3874	-0.3948	-0.3661	-0.3683	0.2891
	octo a	-3318	-3284	3298	-3186	-2408	-2454	-2251	-2263	-3497		octo a	0.1868	0.2748	0.2794	-0.2642	-0.4005	-0.3435	-0.4422	-0.3837	0.4879
	octo b	-2942	-2662	2654	-2401	-2236	-2266	-1925	-1920	-4210	fev	octo b	0.3220	0.3655	0.3653	-0.2642	-0.4305	-0.3435	-0.4025	0.3414	
	octo c	-3661	-3366	3364	-3503	-1895	-1933			-5124		octo c	0.3433	0.2879	0.2864	-0.2897	-0.3094	-0.2648	-0.3178	-0.2741	
	max	-2592	-2517	-2522	-2324	-2006	-2030			-3926		max	0.3393	0.2877	0.2870	-0.3370	-0.3458	-0.2900	-0.3061	-0.3066	0.5312
mar	ano	-2855	-3520	3546	-3215	-2636	-2637			-6057		ano	0.3386	0.4187	0.4246	-0.3651	-0.2103	-0.2447	-0.3484	-0.2977	0.5893
	octo a	-2532	-3320	3344	-2402	-2480	-2470			-4712	mar	octo a	0.2821	0.3581	0.3638	-0.2629		-0.2084		-0.2297	0.5178
	octo b	-2845	-3242	3278	-2690					-5415		octo b	0.2689	0.3267	0.3334	-0.2438					0.4447
	octo c	-2256	-3047	3057	-3005					-5415		octo c	0.3002	0.3221	0.3281	-0.3546					0.5348
	max	-2607	-3355	3383	-2682					-5373		max	0.3140	0.3784	0.3840	-0.3134				-0.2145	0.2524
abr	ano	-2367	-3541	3545	-3016	-2229	-2248			-5652		ano	0.3273	0.4460	0.4480	-0.3631	-0.2828	-0.3380	-0.2781	-0.3245	0.6009
	octo a									-3313		octo a									
	octo b									-2609	abr	octo b									
	octo c									-2821		octo c									
	max									-3553		max									
maio	ano	-3749	-4096	-4215				-3273	-3481			ano	-0.3173	-0.3786	-0.3982				0.2171	0.2288	
	octo a	-2869	-3323	-3426				-2485	-2563	-3830	maio	octo a	-0.2504	-0.2828	-0.3102				0.2610	0.2620	
	octo b	-3020	-2930	-3074					-2233			octo b	-0.2303	-0.2822	-0.2788				0.2931	0.2920	
	octo c	-4054	-4658	-4766					-3149	-3204		octo c	-0.4118	-0.4743	-0.4833					0.2192	
	max	-3659	-4270	-4383					-2420	-2727		max	-0.3153	-0.3962	-0.3942				0.2079	0.2228	
jun	ano	-3844	-4434	-4655				-2104	-2238	-3426		ano	-0.3863	-0.4475	-0.4702	0.2281			0.2327	0.2570	
	octo a	-3116	-2638	-2516	1908						jun	octo a	-0.3121	-0.2347	-0.2314	0.2168					
	octo b	-2540	-1977	-1985								octo b	-0.2818								
	octo c	-2458	-2089	-2087								octo c	-0.2538	-0.1968	-0.1904	0.2027					
	max	-2760	-2523	-2541								max	-0.2730	-0.1902	-0.1936	0.2099				-0.2197	
jul	ano	-3769	-5324	-5380	2573					-2612		ano	-0.2938	-0.3982	-0.3988	-0.2370			-0.3238		
	octo a	-3761	-5320	-5367	2593					-2418		octo a	-0.3882	-0.5421	-0.5447		0.2242	0.2833		-0.3016	
	octo b	-2719	-3823	-3888						-2768	jul	octo b	-0.4003	-0.5385	-0.5408	0.2510		0.2846			
	octo c	-2196	-3443	-3477						-2438		octo c	-0.2458	-0.4059	-0.3991						
	max	-2594	-3862	-3940						-2768		max	-0.2295	-0.3252	-0.3420						
ago	ano	-3586	-4713	-4758	2910					-2625		ano	-0.3647	-0.4424	-0.4500	0.2819	0.2489		0.2574	-0.3568	
	octo a										ago	octo a		-0.2326	-0.2435						
	octo b											octo b		-0.2678	-0.2963						
	octo c											octo c									
	max											max									
set	ano											ano									
	octo a										set	octo a									
	octo b											octo b									
	octo c											octo c									
	max											max									
out	ano											ano									
	octo a										out	octo a									
	octo b											octo b									
	octo c											octo c									
	max											max									
nov	ano											ano									
	octo a										nov	octo a									
	octo b											octo b									
	octo c											octo c									
	max											max									
dez	ano											ano									
	octo a										dez	octo a									
	octo b											octo b									
	octo c											octo c									
	max											max									

ESTAÇÃO: COI

POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson	Spearman									
Mês	ano	SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup
jan	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2216	0,2535	-0,1754	-0,1808	-0,2243	-0,2278			
fev	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
mar	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
abr	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
maio	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
jun	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
jul	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
ago	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
set	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
out	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
nov	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241
dez	ano									
	octo a									
	octo b									
	octo c									
	8-20h	0,2237	0,2475	0,2465	-0,1168	-0,2558	-0,2381	-0,2356	-0,2356	0,241

ESTAÇÃO: ENT
POLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson	Mês	Spearman											
		SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup	BRCHV	BRCH	CAPE
jan	ano	0.2105				-0.2106				0.3026			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
fev	ano	0.2105	0.2095							0.2601			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
mar	ano	0.2206	0.2188							0.2165			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
abr	ano	-0.2871	-0.3093	-0.307	0.366	0.2462		0.366	0.3876	0.2339			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
maio	ano	-0.2654	-0.3342	-0.3378	0.2256	0.182	0.2027	0.3969	0.4093	-0.2036			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
jun	ano	-0.2025	-0.4141	-0.4167	0.2808					-0.2837			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
jul	ano	-0.2139	-0.216	-0.214						-0.2652			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
ago	ano	-0.3408	-0.4793	-0.4844	0.2314					-0.3107			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
set	ano	-0.201								-0.2173			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
out	ano	-0.198	-0.1974							0.1656			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
nov	ano	-0.2437	-0.1629	-0.1638						-0.2326			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												
dez	ano	-0.2409								-0.2406			
	octo a												
	octo b												
	octo c												
	8-20h												

ESTAÇÃO: HVE
POLLUENTE: DIÓXIDO DE AZOTO

Pearson	Spearman										
	ano	SWI	LI	LIV	KI	CAPE	CAPEV	BRCH	BRCHV	Paup	Mes
jan	octo a									0.3588	ano
	octo b									0.2595	octo a
	octo c									0.2572	octo b
	8-20h									0.1851	octo c
	max									0.3106	max
fev	ano									0.3588	ano
	octo a									0.2595	octo a
	octo b									0.2572	octo b
	8-20h									0.1851	octo c
	max									0.3106	max
mar	ano									0.4009	ano
	octo a									0.3588	octo a
	octo b									0.2572	octo b
	8-20h									0.1851	octo c
	max									0.4009	max
abr	ano									0.4009	ano
	octo a									0.3588	octo a
	octo b									0.2572	octo b
	8-20h									0.1851	octo c
	max									0.4009	max
maio	ano									0.2688	ano
	octo a									0.1853	octo a
	octo b									0.2636	octo b
	8-20h									0.2636	octo c
	max									0.2679	max
jun	ano									0.2679	ano
	octo a									0.2595	octo a
	octo b									0.2612	octo b
	8-20h									0.2037	octo c
	max									0.2164	max
jul	ano									0.3408	ano
	octo a									0.1533	octo a
	octo b									0.3335	octo b
	8-20h									-0.33	octo c
	max									-0.3059	max
ago	ano									0.3431	ano
	octo a									-0.3431	octo a
	octo b									-0.3331	octo b
	8-20h									-0.194	octo c
	max									-0.3596	max
set	ano									0.1533	ano
	octo a									-0.3596	octo a
	octo b									-0.3335	octo b
	8-20h									-0.33	octo c
	max									-0.3059	max
out	ano									0.2607	ano
	octo a									0.1903	octo a
	octo b									0.1638	octo b
	8-20h									0.1638	octo c
	max									0.1976	max
nov	ano									0.2607	ano
	octo a									0.1533	octo a
	octo b									0.1533	octo b
	8-20h									0.1533	octo c
	max									0.1533	max
dez	ano									0.2607	ano
	octo a									0.1533	octo a
	octo b									0.1533	octo b
	8-20h									0.1533	octo c
	max									0.1533	max

Anexo III

Concentrações de ozono em Madrid, Espanha: hipótese de intrusão estratosférica

Evolução das concentrações de ozono medidas em várias estações da rede de qualidade do ar da área metropolitana de Madrid, entre o dia 27 de Abril e o dia 1 de Maio de 2000.

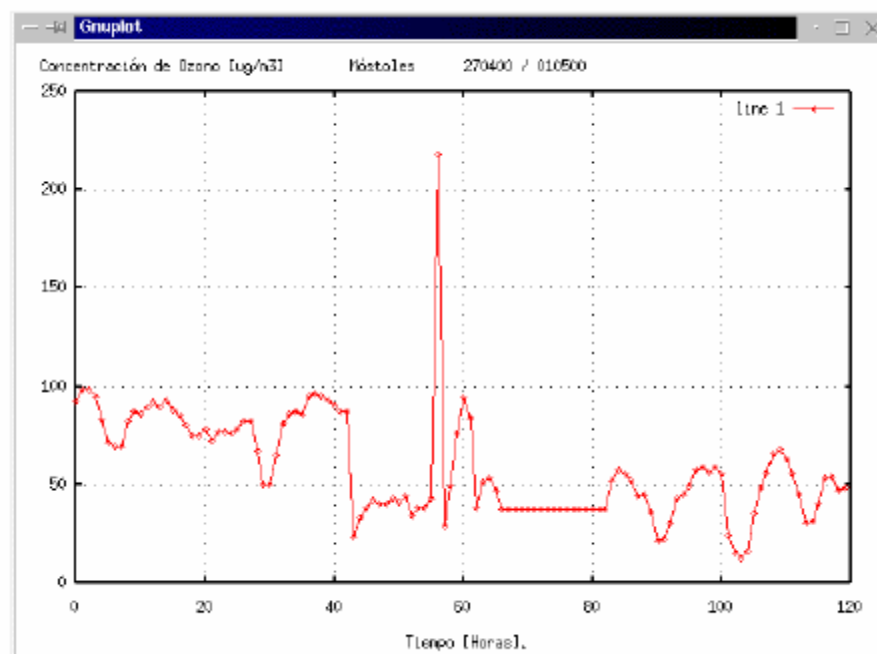


Figura AIII 1: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Móstoles.

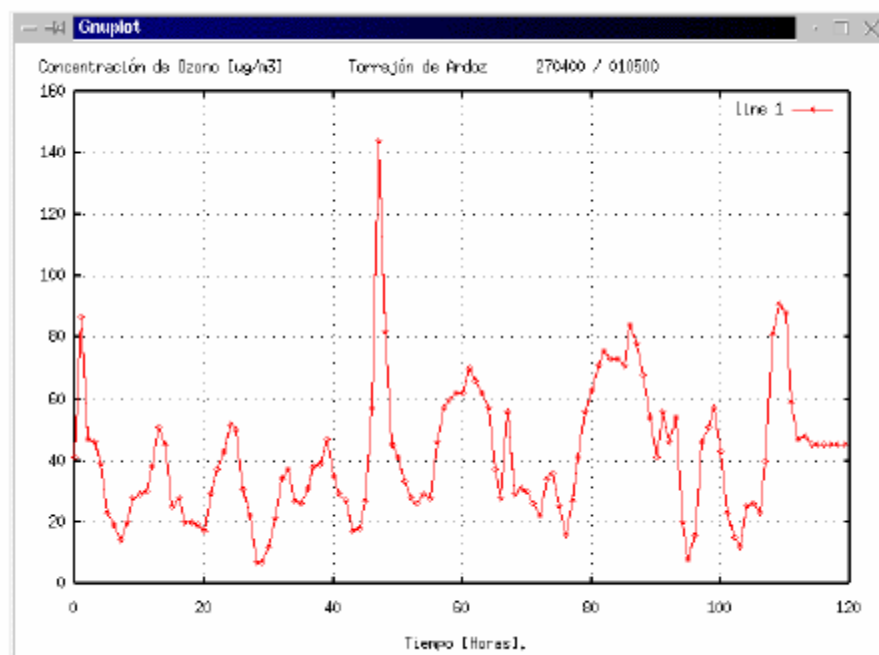


Figura AIII 2: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Torrejón de Ardoz.

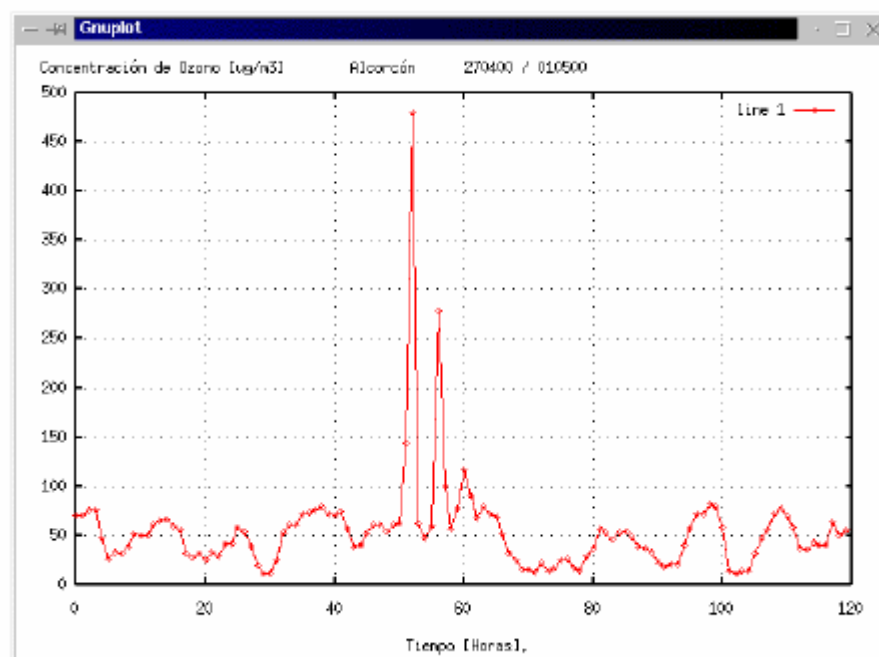


Figura AIII 3: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Alcocón.

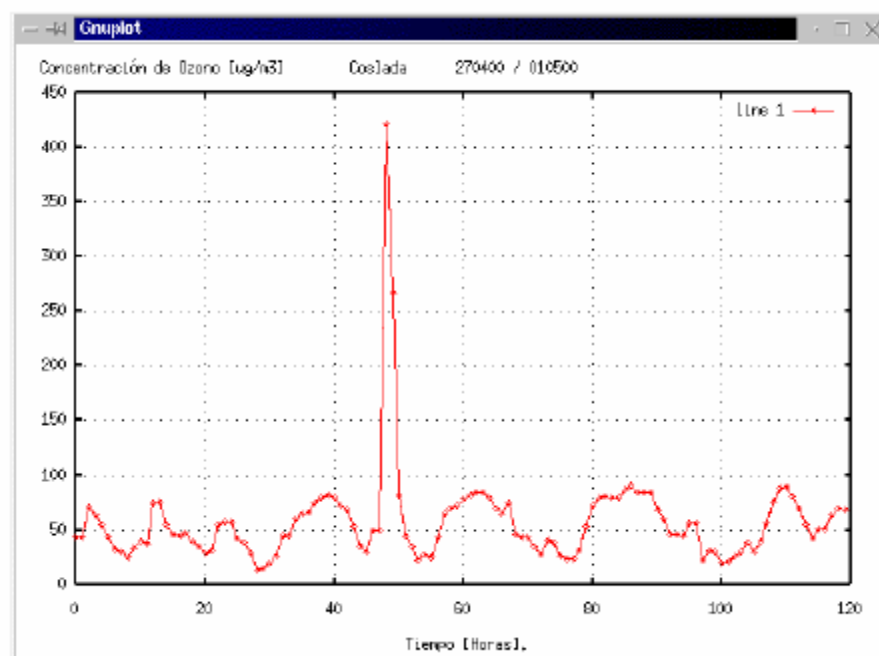


Figura AIII 4: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Coslada.

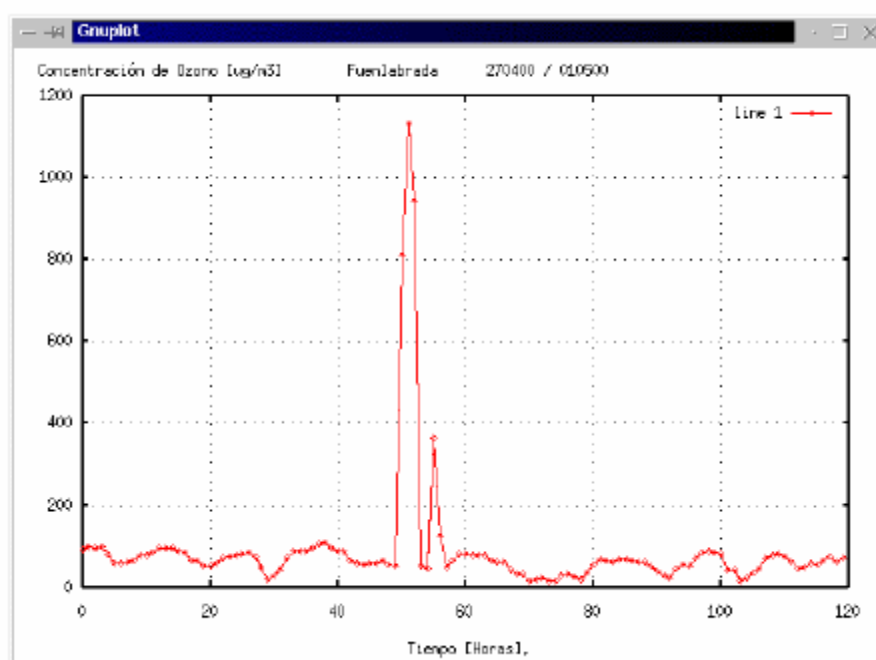


Figura AIII 5: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Fuenlabrada.

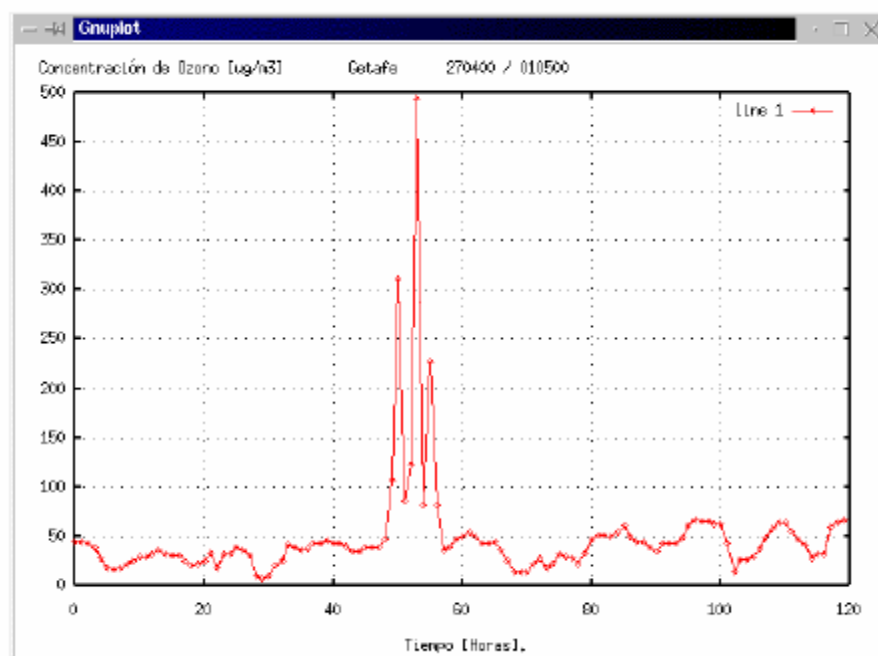


Figura AIII 6: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Getafe.

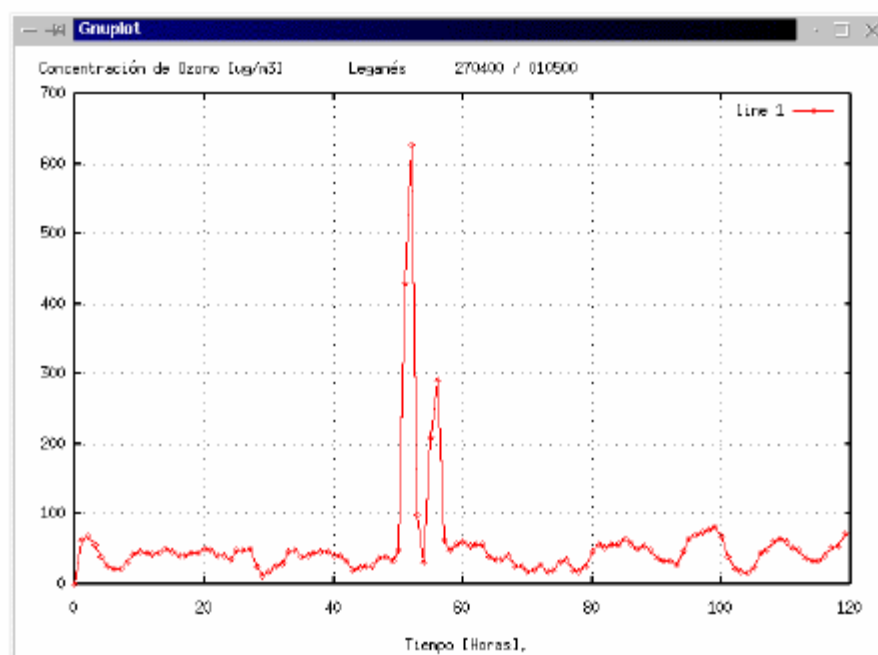


Figura AIII 7: Concentrações de ozono medidas entre 27 de Abril e 1 de Maio, de 2000, em Leganés.